

Влияние климатических условий на состав эфирного масла растений *Artemisia jacutica* (Asteraceae)

Е. П. ДЫЛЕНОВА¹, С. В. ЖИГЖИТЖАПОВА¹, Б. В. ЖИГЖИТЖАПОВ¹,
Б. М. ЖИГМИТЦЫРЕНОВА¹, А. С. ТАРАСКИНА¹, О. А. АНЕНХОНОВ²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Байкальский институт природопользования СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: edylenova@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: anen@yandex.ru

Статья поступила 11.01.2023

После доработки 24.01.2023

Принята к печати 24.01.2023

АННОТАЦИЯ

Artemisia jacutica Drob. (полынь якутская) – восточносибирский эндем, двулетник. Этот вид распространен на территории Саха-Якутии и юга Средней Сибири, где растет на засоленных разнотравных и остепненных лугах, степных участках, солончаках и солонцах, а также по старым пашням и сорным местам. В Бурятии вид довольно редок и здесь проходит юго-восточная граница его ареала. Эфирное масло полыни якутской в качестве основного компонента содержит хамазулен – соединение, обладающее противовоспалительным эффектом. На основе собственных и литературных данных показано, что на формирование компонентного состава эфирного масла растений оказывают влияние климатические условия, что, очевидно, обеспечивает наилучшую адаптацию растений к условиям произрастания. В результате воздействия климатических условий на компонентный состав эфирного масла растений полыни якутской, образуются два хемотипа – “бурятский” и “якутский”. Установлено, что формирование этих хемотипов происходит вследствие различий в уровне тепло- и влагообеспеченности мест произрастания, выражаемом через гидротермический коэффициент. На соотношение компонентов в эфирном масле в большей степени оказывает влияние температурно-влажностный коэффициент экстремальности, вычисленный на основе годовых данных. Климатические параметры (температура воздуха, атмосферные осадки и др.) и их интегральные характеристики влияют на содержание отдельных компонентов в эфирном масле непосредственно или в сочетании между собой, усиливая или ослабляя влияние друг друга.

Ключевые слова: полынь якутская, эфирное масло, хемотип, компонентный состав, климатические параметры, гидротермический коэффициент, температурно-влажностный коэффициент экстремальности.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не вызывает сомнений, что вещества вторичного обмена, в том чис-

ле компоненты эфирного масла, обеспечивают наилучшую адаптацию растений к условиям произрастания. Биохимическая пластичность

является важным способом адаптации к изменчивости условий среды как во времени, так и в пространстве [Высочина, 1999]. Среди факторов, определяющих состав эфирного масла и содержание каждого из его компонентов, одно из ведущих мест занимает климат. При долговременном влиянии климатических факторов формируется определенный хемотип эфирного масла. Ранее на основе анализа собственных и литературных данных нами показано, что голарктический вид *Artemisia vulgaris* L. формирует три хемотипа эфирного масла в зависимости от климата (гумидный, семигумидный и аридный) на территории произрастания. В условиях гумидного климата эфирное масло характеризуется высоким содержанием β -туйона, в семигумидном – α -пинена и α -туйона, тогда как в аридном климате в составе эфирного масла заметно возрастает доля сесквитерпенов [Zhigzhitzhapova et al., 2016]. Климатические факторы зависят от географического положения местности, прежде всего географической широты и долготы. У видов полыней с евроазиатским типом ареала (например, *A. annua* L., *A. frigida* Willd.) четко прослеживаются два хемотипа, связанных с географическим (долготным) положением популяций – западным или восточным. В восточных популяциях появляются хемотипы, характерные для растений, произрастающих в горных районах [Zhigzhitzhapova et al., 2017, 2020]. Эколого-географические условия районов обитания североазиатского вида – полыни Гмелина (*A. gmelinii* Web. ex Stechm.) – также способствуют формированию эфирного масла двух хемотипов: “индийского” – с преобладанием в составе иррегулярных монотерпеноидов, и “сибирского” – с доминированием среди компонентов монотерпеноидов типа ментана. В растениях “сибирского” хемотипа наблюдается тенденция к формированию двух линий – западной, с преобладанием монотерпеноидов типа камфана (камфоры, борнеола и т. д.), и восточной, с наибольшим накоплением сесквитерпеновых соединений [Жигжитжапова и др., 2021].

Однако для видов с более узкими ареалами определение связи “климат → состав эфирного масла”, из-за относительного сходства климатических условий районов их произрастания требует более углубленного анализа

данных по основным климатическим параметрам, в частности, таким как температура воздуха, атмосферные осадки, число дней с осадками больше или равно 1 мм, среднемесячная относительная влажность воздуха и др., а также их интегральных характеристик.

Объектом настоящего исследования является восточносибирский эндем, двулетник *Artemisia jacutica* Drob. (полынь якутская). Этот вид обычен в Якутии, где растет на засоленных разнотравных и остепненных лугах, степных участках, солончаках и солонцах, а также по старым пашням и сорным местам [Данилова и др., 2011], широко распространен на юге Средней Сибири [Флора Сибири, 1997], а также имеет малочисленные местонахождения в Бурятии [Флора Сибири, 1997; Определитель растений Бурятии, 2001], где проходит юго-восточная граница его ареала. Полынь якутская привлекает внимание исследователей как источник хамазуленсодержащего эфирного масла. Эфирные масла, содержащие хамазулен в качестве основного компонента, обладают противовоспалительным эффектом. Классическим примером таких масел является эфирное масло ромашки аптечной [Атажанова, 2008]. Другими источниками хамазуленсодержащих эфирных масел являются растения рода полынь (*Artemisia* L.): *Artemisia sieversiana* Willd., *A. macrocephala* Jacq. ex Besser, *A. pontica* L., *A. samoiedorum* Pamp., *A. jacutica* Drob. Эфирные масла перечисленных растений обладают выраженным ранозаживляющим и противовоспалительным действием, а эфирное масло полыни якутской проявляет ранозаживляющий эффект на модели напалмового ожога [Саратиков и др., 1986; Калинин и др., 2000].

Цель настоящей работы – установить особенности формирования состава эфирного масла в растениях полыни якутской в связи с влиянием отдельных климатических параметров (температура воздуха, атмосферные осадки и др.) и их интегральных характеристик.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор материала для изучения проводили в местах естественного произрастания на территории Республики Бурятия (Россия) – Еравнинский район, окрестности с. Ширинга

в августе 2012, 2015–2020 гг. Образцы для исследования собраны в фазу полного цветения. Результаты исследования образцов 2012, 2015–2020 гг. опубликованы ранее [Zhigzhitzharova et al., 2015; Dylenova et al., 2021a]. В настоящей статье впервые приводится полный состав эфирных масел растений южной части популяции 2016 г. сбора. Ранее было опубликовано лишь краткое сообщение, где отмечены основные семь компонентов образца [Дыленова и др., 2021]. Гербарные образцы хранятся в лаборатории химии природных систем БИП СО РАН. Ваучерные образцы *A. jacutica* хранятся в гербарии ИОЭБ СО РАН (УИИ № 019308). Эфирное масло получали методом гидродистилляции из воздушно-сухого сырья (надземная часть растений, в течение 3 ч) в год сбора сырья. Эфирное масло исследовали методом хромато-масс-спектрометрии на газовом хроматографе Agilent Packard HP 6890 N с квадрупольным масс-спектрометром (HP MSD5973) в качестве детектора. Использовалась 30-метровая кварцевая колонка HP-5 MSD с внутренним диаметром 0,25 мм. Количественный анализ выполняли методом внутренней нормировки по площадям пиков без использования корректирующих коэффициентов. Качественный анализ был основан на сравнении рассчитанных значений линейных индексов удерживания, времен удерживания, полных масс-спектров с библиотекой хромато-масс-спектрометрических данных летучих веществ растительного происхождения [Ткачев, 2008]. Данные по эфирному маслу *A. jacutica* с территории Республики Саха-Якутия привлечены из литературных источников [Ханина и др., 1992, 1999].

Для характеристики основных климатических параметров привлекались специализированные данные, представленные ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных”: температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные), сумма осадков (месячные данные), температура воздуха (месячные данные), число дней с осадками больше или равно 1 мм, среднемесячная относительная влажность воздуха, продолжительность солнечного сияния (месячные данные) и др. Кроме того, были вычислены интегральные характеристики: гидротермический коэффициент увлажнения Се-

лянинова (ГТК), температурно-влажностный коэффициент экстремальности ($K_{\text{экстр}}$), индекс эвапотранспирации (SPEI) и др.

Для характеристики уровня тепло- и влагообеспеченности территорий рассчитан ГТК по формуле: $\text{ГТК} = R \times 10 / \Sigma t$, где R представляет собой сумму осадков в миллиметрах за период июнь–август со средней суточной температурой выше $+10^\circ\text{C}$, Σt определяет сумму среднесуточных температур в градусах Цельсия ($^\circ\text{C}$) за то же время. Для расчета использовали данные метеостанций “Якутск” за 1990–1998 гг. и “Сосново-озерское” за 2012, 2015–2020 гг. Временной промежуток для расчета ГТК по метеостанции “Якутск” принят с учетом того, что в работах [Ханина и др., 1992, 1999] не указаны годы, в которые был проведен сбор, а для метеостанции “Сосново-озерское” – соответственно годам, в которые были собраны образцы для анализа.

Для сравнения условий произрастания растений в разные годы вычислен $K_{\text{экстр}}$, который представляет собой отношение среднего значения температуры за определенный период к количеству осадков за тот же период $K_{\text{экстр}} = t^\circ\text{C}/\text{мм}$ [Журавская и др., 1998]. Также вычислены такие показатели, как сумма суточных температур ($\Sigma t_{\text{вег}}$) и осадков ($\Sigma R_{\text{вег}}$) с начала вегетации (май) до момента сбора растений, сумма суточных температур ($\Sigma t_{\text{год}}$) и осадков ($\Sigma R_{\text{год}}$) с августа предыдущего года по август года сбора. Был вычислен температурно-влажностный коэффициент экстремальности за периоды с начала вегетации до момента сбора ($K_{\text{экстр. вег}}$) и ($K_{\text{экстр. год}}$). Для удобства работы результаты умножены на 100 и 1000 соответственно, и округлены до целочисленных значений. Стандартизированный индекс осадков и SPEI рассчитывался с помощью пакета SPEI [Svoboda, Fuchs, 2016]. Индекс SPEI был вычислен как для календарного года (январь–декабрь) ($\text{SPEI}_{\text{кал}}$), так и за период с августа предыдущего года по август года сбора ($\text{SPEI}_{\text{год}}$).

Для выявления влияния основных климатических параметров (температура воздуха, атмосферные осадки и др.) и их интегральных характеристик на состав эфирного масла полыни якутской были построены модели линейной регрессии трех типов [Гельман и др., 2022]. Первый тип модели представлен уравнением $y = a \cdot x + b$. Этот тип

модели предполагает, что содержание некоторого компонента эфирного масла y линейно зависит от некоторого параметра x . Уравнение второго типа модели имеет вид $z = a*x + b*y + c$. Как и в первом случае, предполагается линейная зависимость содержания некоторого компонента эфирного масла y , но в этот раз от двух параметров. Модель третьего типа имеет вид $z = a*x + b*y + c*x*y + d$. Модель похожа на модель второго типа, однако слагаемое взаимодействие $c*x*y$ показывает, насколько сильно один параметр влияет на эффект другого. Моделирование произведено в интерпретаторе языка программирования R версии 4.2.1 для платформы $x86_64$ -pc-linux-gnu. Модели линейной регрессии строились с помощью встроенных функций R , таких как функция lm , и операции над структурами данных типа $data.frame$. Проверка гипотез Гаусса – Маркова проводилась с помощью функции $gvlna$ из пакета “ $gvlna$ ” [Pena, Slate, 2006].

Данные по компонентному составу эфирного масла с целью визуализации обработаны методом главных компонент (МГК-анализ, программный пакет *Sirius version 6.0*, Pattern Recognition Systems, a/s, Норвегия).

Исследование полыни якутской как источника хамазуленсодержащего эфирного масла начато нами в 2012 г. и продолжается по сей день, но уже в более широком контексте [Zhigzhitzhapova et al., 2015; Dylenova et al., 2019, 2021; Дыленова и др., 2021, 2021a, б]. Выход эфирного масла составил от 0,45 до 2,11 % (в пересчете на воздушно-сухое сырье). Состав эфирного масла полыни якутской, произрастающей на территории Бурятии, представлен в табл. 1. Различия в содержании основных компонентов между эфирным маслом из надземной части и эфирным маслом из вегетативных частей растения (из листьев и стеблей) более выражены, чем из надземной части и соцветий. Так, содержание хамазулена в эфирном масле из надземной части (2019 г.) составляет 47,77 %, из соцветий – 67,75 %, из стеблей – только 7,89 %, γ -эвдемола из надземной части – 25,39 %, из соцветий – 26,91 %, из стеблей – 3,94 % (см. табл. 1).

В литературе помимо сведений о составе эфирного масла “бурятской” популяции имеются данные о химическом составе эфирного

Т а б л и ц а 1
Компонентный состав эфирного масла растений *Artemisia jacutica* Drob.,
произрастающих на территории Бурятии*

Компонент	Содержание компонентов, % от цельного масла												
	Год сбора**	2012 ^c	2015 ^o	2015 ^c	2016 ^c	2016 ^o	2017 ^c	2018 ^c	2019 ^c	2019 ^c	2019 ^c	2019 ^c	2020 ^c
Выход масла, %		0,5	0,6	0,5	0,7	0,7	0,5	1,0	1,4	2,1	1,1	0,5	0,7
Часть растения (в скобках – источник данных)	J	Надземная [Zhigzhitzhapova et al., 2015]	Надземная [Dylenova et al., 2021]	Надземная [Dylenova et al., 2021]	Надземная [Dylenova et al., 2021]	Надземная (полный состав приводится впервые)	Надземная [Dylenova et al., 2021]	Соцветия [Dylenova et al., 2021]	Надземная [Dylenova et al., 2021]	Соцветия (б) [Dylenova et al., 2021]	Листья (б) [Dylenova et al., 2021]	Стебли (б) [Dylenova et al., 2021]	Надземная (б) [Dylenova et al., 2021]
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Фенилпропаноиды													
Эвгенол	1359							0,04					0,23
Монотерпеновые углеводороды													
Мирцен	991				0,88			0,64	0,18				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
α -Фелландрен	1004				0,15			0,09	0,03				
α -Терпинен	1017							0,12					0,16
γ -Терпинен	1058		0,53	0,50	0,43	0,07		0,25	0,18			0,07	0,30
Туйен-3	926							0,03	0,04				
α -Пинен	932				0,17			0,09	0,11				
Сабинен	973							0,05	0,05				
β -Пинен	975							0,03	0,05				
Карен-2	1000								0,12				
Окисленные монотерпеноиды													
Линалоол	1100							0,44					0,26
<i>n</i> -Цимол	1024			0,57	0,35			0,21	0,11		0,15		0,25
Терпинолен	1088							0,05					
<i>n</i> -цис-Ментен-2-ол	1121							0,04					
Терпинеол-4	1177	0,90		0,65	0,99	0,4		1,06	0,59				0,89
α -Терпинеол	1191	0,80			0,60	0,42		0,94	0,63			0,11	0,81
1,8-Цинеол	1031	2,10	2,32	2,04	3,43	0,51	1,51	2,57	2,05	0,40	1,91	0,45	1,94
Борнеол	1166							0,41					
Сесквитерпеновые углеводороды													
(E)- β -Фарнезен	1458				0,95			0,59					
β -Элемен	1392							0,2					
β -Куркумен	1513				0,14				0,05				
γ -Куркумен	1482	0,40			0,56				0,25	0,15		0,10	
<i>ar</i> -Куркумен	1485	0,30			0,65							0,26	0,41
Гермакрен D	1484							1,82					0,23
<i>цис</i> -Кадина-1,4-диен	1496								0,08				0,15
Кариофиллен	1422	0,40			1,36			1,41	0,61			0,13	0,91
Гумулен	1456							0,18	0,06				
Селина-4,11-диен	1477	1,40		1,14	1,28		1,20	1,71	0,96	0,62	0,25	0,15	2,95
Бициклогермакрен	1500							0,30	0,15				0,08
d-Аморфен	1553								0,12				0,16
Валенсен	1631												0,60
Хамазулен	1730	53,60	25,95	40,37	26,97	39,16	23,34	37,40	47,77	67,75	74,85	7,89	30,82
α -Копаен	1378							0,22					
β -Бурбунен	1387							0,33					
Хелифолен	1403							0,19					0,17
β -Копаен	1432							0,07					
Аллоаромадендрен	1464							0,11					
β -Кубубен	1392								0,53				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Окисленные сесквитерпеноиды													
Нерилацетат	1366								0,10				
Геранилацетат	1385						3,13						
Нерилизобутаноат	1492								0,11	1,44		0,66	
Нерил-2-метилбутаноат	1579	3,40	9,03	5,91	7,71	5,05	10,10	4,73	3,64	2,36	3,00	20,92	3,40
Нерил-3-метилбутаноат	1585	6,40	21,33	9,79	11,97	8,19	11,61	4,83				38,07	
Нерилпентаноат	1636								6,92			14,13	7,43
Геранил-2-метилбутаноат	1604	0,60			0,96	0,84			0,69		4,93	2,94	0,64
Геранил-3-метилбутаноат	1610	1,70			2,64	2,35			2,08			8,54	1,25
Геранилпентаноат	1657		4,31										
Нерилгексаноат	1721		6,45	2,98	3,29	1,70	2,42	1,06	1,78		2,16	1,31	1,88
Элемол	1553				0,48	0,74		1,24	0,89				0,66
α -Бисаболол	1688	1,30						1,53			1,03		
Дегидросесквицинеол	1471	0,90						0,69	0,40	0,28	0,53	0,33	1,21
γ -эвдесмол	1633	23,90	30,08	36,05	34,03	39,98	46,90	32,78	25,39	26,91	11,19	3,94	38,85
Кариофиллен-4-аль-13	1644								0,70				0,60
β -Эвдесмол	1651					0,59		1,25					0,70
α -Эвдесмол	1655												0,91
γ -Костол	1748												0,52
Кобаборнеол	1605												0,61
Всего идентифицировано		98,10	100	100	92,99	100	100	99,70	97,42	100	99,91	100	99,98
Сумма монотерпеноидов		3,80	2,85	3,76	7,01	1,40	1,51	7,06	4,14	2,06	0,40	0,63	4,84
Сумма сесквитерпеноидов		94,3	97,15	96,24	92,99	98,60	98,49	92,64	93,28	97,94	99,51	99,37	95,14
Сумма углеводов без хамазулена		2,50	0,53	1,64	6,57	0,07	1,20	8,43	3,57	0,25	0,77	0,71	6,12
Сумма окисленных соединений		42,00	73,52	57,99	66,45	60,77	75,46	53,87	46,08	24,90	31,39	91,40	63,04

* Пустая ячейка означает, что компонент отсутствует в образце.

** Индексы «ю» и «с» означают, что образцы растений собраны в южной и северной части популяции соответственно.

масла дикорастущих растений полыни якутской из Республики Саха-Якутия (окр. г. Якутска), а также интродуцентов, в том числе из разных частей растений – соцветий, листьев, стеблей [Ханина и др., 1992, 1999]. Для растений, произрастающих в Республике Хакасия, опубликован хроматографический профиль единственного образца из Аскизского района [Ткачев и др., 2017].

Основным компонентом образцов эфирного масла полыни якутской из Бурятии и Якутии, как из цельной надземной части, так и отдельных частей растений, является хамазулен. Его содержание в эфирном масле из цельной надземной части растений из Бурятии составляет 23,6–47,8 %, из Саха-Якутии – 20,0–46,8 % от цельного масла. Наименьшее содержание хамазулена отмечено

в эфирном масле из стеблей, наибольшее – из листьев как из растений Бурятии, так и Саха-Якутии, в то время как для образца из Хакасии он не указан.

При сравнении площадей соответствующих хроматографических пиков выявлено, что основными компонентами эфирного масла полыни якутской из Хакасии являются мирцен, 1,8-цинеол, β -эвдесмол, кариофиллен и β -селинен. В растениях всех трех популяций обнаружены α -, β -пинен, сабинен, мирцен, α -терпинен, *n*-цимол, α -терпинеол, 1,8-цинеол, геранил-2-метилбутаноат, нерил-2-метилбутаноат, кариофиллен, γ -эвдесмол, (E)- β -фарнезен, гермакрен Д. В эфирном масле растений из Бурятии и Саха-Якутии также общими являются нерилпентаноат, геранил-3-метилбутаноат, α -бисаболол.

Ряд компонентов (α -фелландрен, γ -терпинен, терпинолен, линалоол, терпинеол-4, α -копаен, β -бурбонен, гумулен, копаборнеол, β -эвдесмол) обнаружены в эфирном масле растений как из Бурятии, так и из Хакасии, а другие терпены, как камфора, δ -кадинен, обнаруживаются в растениях из Хакасии и Саха-Якутии.

В эфирном масле полыни якутской отмечен ряд соединений, характерных только для одного места произрастания. Так, селина-4,11-диен, γ -куркумен, элемол, дегидросесквицинеол обнаружены в масле из растений Бурятии, тогда как интермедеол, кариофилленаль-12, дегидрохамазулен – из Саха-Якутии. Их содержание не превышает 2–3 %.

Только в образцах из Хакасии обнаружены камфен, лимонен, цис-, транс- β -оцимены, циклосативен, β -селинен, Т-кадинол, α -эпибисаболол.

Поскольку в литературе [Ткачев и др., 2017] не представлены данные о содержании отдельных компонентов эфирного масла полыни якутской из Хакасии, то сравнительный анализ проводился для образцов из Бурятии и Саха-Якутии. В результате установлено, что содержание α -бисаболола в образцах из Бурятии не превышает 1,5 %, в то время как в образцах из Саха-Якутии – не менее 3 % и может достигать 19 %. В то же время другой сесквитерпеноид – γ -эвдесмол, является основным компонентом эфирного масла полыни якутской из Бурятии, где его содержание может варьировать от 23 до 46 % (цельная надземная часть). В эфирном масле растений из Саха-Якутии данный компонент может отсутствовать, или, наоборот, быть одним из основных, достигая 18 %.

Особое внимание обращает на себя большое количество производных гераниола и его изомера нерола в составе эфирного масла полыни якутской. Так, в числе производных гераниола представлены: геранил-2-метилбутаноат, геранилтиглат, геранил-3-метилбутаноат, геранилпентаноат, геранилацетат. Геранил-2-метилбутаноат и геранил-3-метилбутаноат являются константными составляющими и их содержание в масле из надземной части достигает 1 и 2 % соответственно. Геранилтиглат обнаружен в масле из Саха-Якутии

Т а б л и ц а 2

Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) по данным метеостанций “Якутск” и “Сосново-озерское”

Год	“Якутск”*			Год	“Сосново-озерское”		
	R	Σt	ГТК		R	Σt	ГТК
1990	101,1	1549,3	0,7	2012	180,5	1285,1	1,4
1991	92,2	1525,6	0,6	2015	130,5	1481,6	0,9
1992	78,1	1475,4	0,5	2016	227,0	1488,9	1,5
1993	51,1	1510,7	0,3	2017	207,5	1413,8	1,5
1994	158,4	1370,1	1,2	2018	246,3	1422,8	1,7
1995	86,0	1585,9	0,5	2019	146,3	1466,0	1,0
1996	87,4	1413,3	0,6	2020	268,0	1390,4	1,9
1997	122,1	1599,5	0,8				
1998	44,3	1850,3	0,2				
1998	155,7	1530,7	1,0				

* Для растений из Саха-Якутии в первоисточнике нет указаний на год сбора, поэтому ГТК рассчитан на период 1990–1998 гг.

(до 0,6 %), тогда как геранилпентаноат и геранилацетат – только в единичных образцах из Бурятии, но их содержание составляет 3–4 %. Производные нерола также представлены пятью соединениями: нерил-2-метилбутаноат, нерил-3-метилбутаноат, нерилпентаноат, нерилгексаноат, нерил-2-пропионат. При этом первые два производных также являются константными и их содержание в эфирном масле может достигать 10–11 %. Нерилпентаноат отмечен не во всех образцах, но его содержание может достигать 14 %. Нерилгексаноат характерен для полыни якутской из Бурятии, а нерил-2-пропионат – из Саха-Якутии. Доля нерил-3-метилбутаноата в эфирном масле из надземной части растений Якутии при значении ГТК 0,2–1,2 (табл. 2) составляет 6,27 % [Ханина и др., 1999], что меньше, чем в эфирном масле из растений Бурятии (8,19–21,33 % (см. табл. 1) при значении ГТК 0,9–1,7 (см. табл. 2). Содержание γ -эвдесмола в эфирном масле из надземной части растений бурятской популяции значительно выше, чем в таковом из якутской популяции. Среднее

значение φ в Якутии за период 1990–1998 гг. составляет 59,8 %, средняя $t_{\text{год}} = -8,4$ °С, тогда как в Бурятии $\varphi\% = 53,5$ –71 %, средняя $t_{\text{год}} = -0,4 - (-3,5)$ °С (табл. 3, 4), что указывает на большую влажность и температуру.

Таким образом, состав эфирного масла полыни якутской из Республик Бурятия и Саха-Якутия различается, что иллюстрирует биplot (ГК1–ГК2), полученный на основе вышесказанного (рисунок). Распределение образцов на биplotе не зависит от фазы развития и исследуемой части растений. Более того, проекции переменных, характеризующих образцы эфирного масла из разных частей растений, могут располагаться на биplotе вблизи с проекциями переменных эфирного масла из цельной надземной части того же года сбора. Так, например, образцы 2019 г. из Бурятии 4 (листья), 5 (соцветия), 6 (стебли) и 3 (надземная часть) расположены в одном локусе, также сгруппировались образцы из Саха-Якутии – 17 (стебли), 18 (листья), 19 (соцветия) и 20 (надземная часть). Вместе с тем другая часть образцов (1, 7–12), представляющих

Т а б л и ц а 3

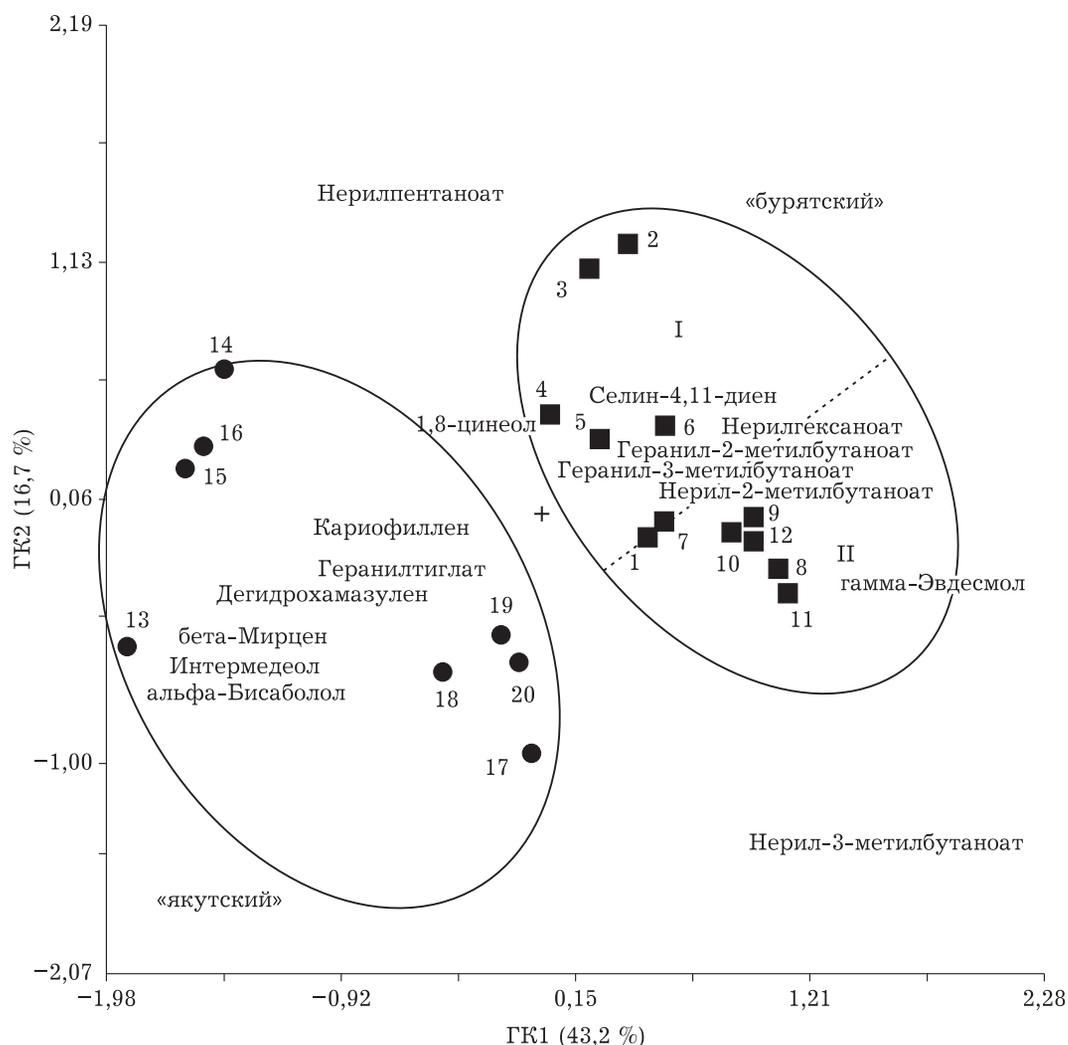
Средняя температура (Σt), сумма осадков (ΣR) и температурно-влажностный коэффициент экстремальности ($K_{\text{экстр}}$) за вегетационный и годовой периоды (метеостанция “Сосново-озерское”)

Год	Период					
	вегетационный			годовой		
	средняя $t_{\text{вег}}$	$\Sigma R_{\text{вег}}$	$K_{\text{экстр. вег.}} \times 100$	средняя $t_{\text{год}}$	$\Sigma R_{\text{год}}$	$K_{\text{экстр. год}} \times 1000$
2012	12,6	262,7	4,8	-3,5	362,7	9,7
2015	14,0	161,2	8,7	-0,7	268,0	2,6
2016	13,7	244,8	5,6	-1,3	430,3	3,0
2017	14,5	252,9	5,7	-0,7	425,2	1,7
2018	13,8	270,1	5,1	-0,8	484,0	1,7
2019	13,3	162,4	8,1	-0,6	300,6	2,0
2020	13,6	286,6	4,7	-0,4	376,2	1,1

Т а б л и ц а 4

Число дней с осадками больше 1 мм в течение года (Σ дней), SPEI, продолжительность солнечного сияния за июнь–июль года сбора (Σ часов), относительная влажность воздуха (среднее за июнь–июль года сбора, φ , %)

Год	Σ дней	SPEI _{год}	SPEI _{кал}	Σ часов	φ , %	$\Sigma t_{\text{вег}}$
2012	48	0,39	0,71	499	69	1284,8
2015	30	-0,42	-0,68	633	53,5	1570,5
2016	32	0,33	-0,03	650	54	1587,2
2017	35	0,07	-0,25	620	57,5	1684,6
2018	43	0,18	0,04	502	71	1662,8
2019	42	-0,08	0,07	606	66	1494,4
2020	40	-0,06	0,86	536	67	1605,7



Биplot (ГК1–ГК2) данных компонентного состава эфирного масла растений *Artemisia jacutica* Drob. (согласно расчетам по методу главных компонент). Овалами показаны выделенные хемотипы, квадратами показаны образцы эфирного масла из растений, произрастающих на территории Республики Бурятия: 1 – в 2012 г. (надземная часть), 2 – в 2020 г. (надземная часть), 3 – в 2019 г. (надземная часть), 4 – в 2019 г. (листья), 5 – в 2019 г. (соцветия), 6 – в 2019 г. (стебли), 7 – в 2018 г. (соцветия), 8 – в 2017 г. (надземная часть), 9, 10 – в 2016 г. (надземная часть), 11, 12 – в 2015 г. (надземная часть). Кругами обозначены образцы эфирного масла из растений, произрастающих на территории Республики Саха-Якутия: 13 – из надземной части [Ханина и др., 1992]; 14 – в фазу стеблевания, 15 – в фазу бутонизации, 16 – в фазу цветения, 17 – из стеблей, 18 – из листьев, 19 – из соцветий, 20 – из надземной части [Ханина и др., 1999]

разные части растений, собранных в разные годы, также образовала довольно компактный кластер.

Рассмотрим подробнее распределение образцов из Республики Бурятия на биplotе (см. рисунок). Образцы 2019 г. (образцы 3–6) и 2020 г. (образец 2) обособлены от прочих образцов и для них характерно высокое содержание нерилпентаноата при отсутствии нерил-3-метилбутаноата: это подгруппа I образцов из Бурятии. Образцы прочих лет образуют подгруппу II. Следует отметить,

что образцы 2012 г. (образец 1) и 2018 г. (образец 7) несколько обособлены от образцов 2015–2017 гг. (образцы 8–12) и отличаются от них меньшим содержанием нерил-2-метилбутаноата (до 4,73%), нерил-3-бутаноата (до 6,40%), нерилгексаноата (до 1,06%) по сравнению с таковыми в эфирном масле растений 2015–2017 гг. сбора. Основные затруднения при анализе данных были связаны с небольшим объемом выборки и с незначительной разницей между средней температурой и суммой осадков как в течение года, так и веге-

тационного периода, так как образцы собраны с одной популяции. Объяснить взаимное расположение на биоплоте проекций, соответствующих образцам, собранным в годы, резко отличавшимся по какому-либо параметру, достаточно легко. Так, наибольшая разница между значениями средней температуры в течение года отмечена между 2012 и 2020 гг. Среднегодовая температура в 2012 г. составила $-3,5$ °С, а в 2020 г. – $-0,4$ °С, при этом разница в сумме годовых осадков была незначительна: $\sum R_{\text{год}} = 362,7$ мм (2012 г.) и $\sum R_{\text{год}} = 376,2$ мм (2020 г.). Соответственно, наименее экстремальным был 2020 г. ($K_{\text{экстр. год}} = 1,1$), а наиболее – 2012 г. ($K_{\text{экстр. год}} = 9,7$). Образцы указанных годов находятся на биоплоте в разных подгруппах (см. табл. 3, рисунок).

Проекции, соответствующие образцам, собранным в 2015 и 2019 гг., также находятся в разных подгруппах. Однако суммы выпавших осадков в течение вегетационного периода до момента сбора ($\sum R_{\text{вег}}$) практически одинаковы, различия значений средней температуры небольшие ($t_{\text{вег}} = 14$ °С в 2015 г. и $t_{\text{вег}} = 13,3$ °С в 2019 г.) и значения $K_{\text{экстр. вег}}$ близки (8,7 и 8,1 соответственно) (см. табл. 3). При обращении к значениям климатических параметров за год мы видим, что разность средних температур незначительна. В то же время осадков в течение года в 2019 г. выпало

значительно больше, чем в 2015 г., и поэтому 2019 г. оказался менее экстремальным ($K_{\text{экстр. год}} = 2,0$) по сравнению с 2015 г. ($K_{\text{экстр. год}} = 2,6$). Это подтверждает их расположение в разных подгруппах на биоплоте. Таким образом, средняя температура и сумма осадков оказывают влияние на состав эфирного масла полыни якутской. Результат их совместного действия наилучшим образом характеризуют $K_{\text{экстр. год}}$ и $K_{\text{экстр. вег}}$. Расположение образцов на биоплоте показывает более тесную взаимосвязь с суммой осадков в течение года и величиной $K_{\text{экстр. год}}$ (см. рисунок).

Математические модели выявили, что содержание отдельных компонентов зависит от действия как отдельных климатических параметров (модель первого типа), так и действия двух параметров (второй тип модели), а также один параметр может влиять на эффект другого (уравнение третьего типа). Основными климатическими параметрами и их интегральными характеристиками, влияющими на содержание компонентов в эфирном масле, являются индекс осадков и эвапотранспирации (SPEI), число дней с осадками больше 1 мм в течение года ($\sum \text{дней}$), продолжительность солнечного сияния за июнь – июль года сбора ($\sum \text{часов}$), относительная влажность воздуха (φ , %) – среднее за июнь – июль года сбора (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Результаты вычислений содержания компонентов в эфирном масле растений *Artemisia jacutica* Drob., произрастающих на территории Бурятии, по моделям

x	a	y	b	c	z	p-значение	R2 (adjR2)
Модель $z = a*x + b$							
$\sum \text{дней}$	0,11				Селин-4,11-дией	0,028	0,028
$\sum t_{\text{вег}}$	-0,07				Хамазулен	0,021	0,021
Модель $z = a*x + b*y + c$							
SPEI _{кал}	-5,33	$\sum R_{\text{вег}}$	0,03		Нерил-2-метилбутаноат	0,047	0,518
SPEI _{кал}	-16,43	ГТК	13,43		Нерил-3-метилбутаноат	0,036	0,561
SPEI _{кал}	2,42	$\sum \text{часов}$	0,02		Геранил-3-метилбутиноат	0,029	0,591
SPEI _{год}	-2,35	$\sum \text{дней}$	-0,16		Нерилгексаноат	0,023	0,623
Модель $z = a*x + b*y + c*x*y + d$							
φ , %	0,12	Средняя $t_{\text{год}}$	0,08	0,08	α -Терпинеол -	0,001	0,922
$\sum \text{дней}$	18,16	$K_{\text{экстр. год}}$	-0,01	-0,01	Элемол	0,015	0,916
SPEI _{кал}	0,12	φ , %	0,08	0,08	α -Бисаболол	0,001	0,830
φ , %	-0,31	$\sum \text{дней}$	-0,02	-0,02	Дегидросесквинеол	0,001	0,948
φ , %	18,16	Средняя $t_{\text{год}}$	0,83	-0,01	γ -Эвдесмол	0,015	0,774

ОБСУЖДЕНИЕ

Растения полыни якутской из Республики Бурятия по уровню тепло- и влагообеспеченности мест произрастания находятся в лучших условиях. Так, значения ГТК, вычисленные по данным метеостанции “Якутск”, колеблются от 0,2 до 1,2, т. е. от “сухих” до “слабозасушливых” условий. Значения же ГТК для метеостанции “Сосново-озерское” – от 0,9 до 1,9, что соответствует диапазону условий от засушливых до влажных (см. табл. 2).

Известно, что в ходе эволюции происходят изменения в составе ферментов путем замены одной или нескольких аминокислот. Если измененный фермент производит полезный продукт для растения, то эти изменения закрепляются в генах [Verma, Shukla, 2015]. В случае полыни якутской – под влиянием длительного и относительно однотипного действия определенных климатических условий (интегральное значение которых выражено через ГТК) сформировались механизмы синтеза определенного набора ферментов, способствующих продукции компонентов эфирного масла того или иного хемотипа. Способность к выработке определенного качественного состава эфирного масла генетически устойчива, о чем свидетельствуют незначительные различия между дикими и интродуцированными формами [Ханина и др., 1999].

Ранее было отмечено на примере *A. absinthium* L., что вариабельность состава эфирного масла в пределах одного (сибирского) хемотипа невелика, но значительна при сравнении разных хемотипов [Ханина и др., 2000]. Для этого же вида были установлены незначительные отличия состава эфирного масла из цельной надземной части и ее отдельных частей, а также низкая вариабельность состава масла в растениях одного и того же хемотипа на протяжении вегетационного периода [Argino et al., 1999]. Сходные закономерности мы наблюдаем и в случае с эфирным маслом полыни якутской: проекции компонентов эфирного масла из Бурятии и Саха-Якутии на биопоте (ГК1–ГК2) группируются по местам произрастания вне зависимости от части растения и фазы развития (см. рисунок). Таким образом, климатические условия, несомненно, определяют различия в составе эфирного масла растений полыни якутской. Эти различия мы считаем основанием для выделения

двух географически дифференцированных хемотипов полыни якутской, состоящих из “бурятской” и “якутской” популяций (см. рисунок), и различающихся как по качественному, так и по количественному составу эфирного масла.

В пределах одного хемотипа количественное содержание компонентов эфирного масла из надземной части в разные годы различается. Однако различия менее значимы в эфирном масле из надземной части растений и ее вегетативных частей. Известно, что продуктивность растений в травяных экосистемах линейно зависит от степени увлажнения почв [Титлянова и др., 1988], на зональном градиенте она более тесно связана с количеством осадков [Базилевич, 1993] и, в целом, чистая продукция нелесных растительных сообществ более тесно коррелирует с осадками, чем с температурой [del Grosso et al., 2008]. Взаимное расположение образцов на биопоте также показывает большую взаимосвязь с годовой суммой осадков, что позволяет нам утверждать, что содержание компонентов эфирного масла зависит от суммы осадков в течение года. Дефицит воды (засуха) снижает рост и продуктивность растений [Frank, 2008] из-за нарушения физиологических и биохимических процессов в растении [Forni et al., 2017]. Изменения находят отражение как в изменении суммарного выхода эфирного масла, так и в его компонентном составе. Между выходом масла из цельной надземной части растений Бурятии и суммой осадков в вегетационный период ($\sum R_{\text{год}}$) существует слабая отрицательная корреляция ($r = -0,52$).

При исследовании ароматических и лекарственных растений *Ocimum basilicum* L. [Mandoulakani et al., 2017], *Thymus vulgaris* L. [Mohammadi et al., 2018] и *Salvia officinalis* L. [Radwan et al., 2017], которые культивировались в условиях ограничения воды, показано, что происходят изменения в составе эфирных масел, выражающиеся в изменении соотношения компонентов, диверсификации (производстве) новых компонентов. Изменения в содержании терпеноидов могут быть связаны с накоплением НАДФН, биосинтезом специфических регуляторов роста растений и экспрессией генов, задействованных в метаболизме терпеноидов [Babaei et al., 2021].

Основной компонент эфирного масла полыни якутской – хамазулен – обнаружен в эфирном масле из растений Бурятии и Саха-Якутии, причем в значительных количествах. В образце растений из Хакасии он не указан. Хамазулен в нативном виде в растениях не содержится, но образуется в ходе термической деструкции из проазуленовых веществ, поэтому большое значение имеют условия выделения эфирного масла. Об образовании хамазулена свидетельствует синяя окраска эфирного масла. Отсутствие хамазулена в образцах из Хакасии может быть обусловлено тем, что гидродистилляция проводилась в течение двух часов [Ткачев и др., 2017], в то время как выделение эфирного масла из растений Бурятии и Саха-Якутии проводили в течение 3 и 6 часов соответственно [Ханина и др., 1999]. Во-вторых, масла из растений Бурятии и Саха-Якутии были выделены из высушенного сырья, а хакасские образцы подвергались анализу в свежесобранном виде. Можно предположить, что в свежесобранном сырье полыни якутской содержание проазуленовых веществ меньше и/или они отличаются от таковых других видов полыней, в составе эфирных масел которых обнаруживается хамазулен; во втором случае для трансформации таких проазуленовых веществ и образования хамазулена необходим более длительный термолиз. Однако последнему предположению противоречит то, что синяя окраска у эфирного масла из растений Бурятии появлялась в течение получаса с момента закипания, в то время как эфирные масла полыней, профили которых представлены в работе [Ткачев и др., 2017], получены гидродистилляцией в течение двух часов из свежесобранного сырья, и хамазулен указан для других видов – *A. sieversiana*, *A. macrocephala*, *A. pontica*. Поэтому наиболее вероятной причиной отсутствия хамазулена в эфирном масле полыни якутской из Хакасии могут быть климатические условия места произрастания, отличающиеся от таковых в Якутии и Бурятии. На примере растений из Бурятии показано, что содержание хамазулена снижается при увеличении суммы суточных температур с начала вегетации до момента сбора ($\sum t_{\text{вег}}$) на 1 °С на 0,07 % (см. табл. 5). Хотя указанная зависимость не может быть прямо экстраполирована на растения в других ча-

стях ареала полыни якутской, однако можно принять тренд уменьшения содержания хамазулена при увеличении суммы суточных температур во время вегетации в качестве общего. Так, сумма среднесуточных температур за период май – август 2004 г. по данным метеостанции “Абакан” составила $\sum t_{\text{вег}} = 2105,3$ °С, тогда как в Бурятии по данным метеостанции “Сосново-озерское” за исследуемый период максимальная $\sum t_{\text{вег}}$ составила 1684,6 °С в 2017 г. (см. табл. 4) и разность – 420,7 °С. Содержание хамазулена согласно первой модели должно снизиться на 27,30 % и составить отрицательную величину по сравнению с содержанием хамазулена в эфирном масле растений, собранных в 2017 г. (см. табл. 1). Таким образом, теоретические расчеты не исключают, что причиной отсутствия хамазулена в составе эфирного масла полыни якутской из Хакасии являются абиотические факторы, а именно высокая суммарная температура в вегетационный период.

В целом, для эфирного масла полыни якутской, произрастающей в Бурятии, характерно преобладание суммы окисленных соединений над суммой углеводов (без учета хамазулена) (см. табл. 1). Преобладание окисленных терпеноидов над терпеновыми углеводородами присуще растениям, испытывающим засуху, и является стресс-реакцией растений на окислительные повреждения [Mohammadi et al., 2018; Babaei et al., 2021].

На состав эфирного масла помимо дефицита воды влияют и другие факторы окружающей среды. Содержания некоторых компонентов в эфирном масле имеют линейную зависимость от значения одного или двух из климатических параметров. Так, наиболее чувствительно к увеличению на единицу значения ГТК содержание нерил-3-метилбутаноата в эфирном масле: при постоянном значении SPEI_{квал} его доля увеличится. Имеет место линейная зависимость между содержанием γ -эвдесмола и значением ϕ , %. В то же время увеличение значения ϕ , % уменьшает эффект от средней $t_{\text{год}}$, и наоборот (см. табл. 5). Следует учитывать небольшой объем выборки для построения моделей, что приводит к невозможности точных вычислений, а только к определению тенденций изменений (уменьшение или увеличение) компонента в составе масла. Так, сравнение данных по содер-

жанию нерил-3-метилбутаноата, γ -эвдесмола в эфирном масле растений полыни якутской из бурятской и якутской популяций показывает, что изменения их доли в эфирном масле согласуются с выявленными закономерностями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено обобщение данных по составу эфирного масла полыни якутской в географическом аспекте. При этом успешно апробировано применение моделей линейной регрессии с визуализацией на основе метода главных компонент, что позволяет считать эту комбинацию методов перспективной для эколого-географических исследований химического состава растений (как минимум – эфирных масел). На основе анализа собственных и литературных данных показано, что компонентный состав эфирного масла является результатом действия климатических условий на растения, обеспечивая, по всей вероятности, наилучшую адаптацию растений к условиям произрастания.

Установлено, что на соотношение компонентов в эфирном масле (хроматографический профиль) в большей степени оказывает влияние интегральное значение температурно-влажностных условий, наблюдавшихся в течение года (от августа предыдущего года до августа года сбора растений) и выражаемых через $K_{экстр}$. Полученные данные свидетельствуют о том, что содержание компонентов эфирного масла, как и продуктивность растений, определяется количеством осадков в течение года, особенно в семиаридных условиях южной части Бурятии. Климатические параметры (температура воздуха, атмосферные осадки и др.) и их интегральные характеристики определяют содержание отдельных компонентов в эфирном масле непосредственно или в сочетании между собой, усиливая или ослабляя влияние друг друга.

Показано, что климатические условия определяют формирование хемотипа эфирного масла полыни якутской. Выявлены два хемотипа – “бурятский” и “якутский”. Основным компонентом эфирного масла полыни якутской в обоих хемотипах является хамазулен. В эфирном масле из растений Бурятии также основным константным компонентом является γ -эвдесмол, тогда как в эфирном масле расте-

ний из Саха-Якутии он может отсутствовать. Хемотип эфирного масла формируется под влиянием уровня тепло- и влагообеспеченности мест произрастания, интегральные показатели которых выражаются через ГТК.

Работа выполнена в рамках государственных заданий БИП СО РАН (FWSU-2021-0010, АААА-А21-121011890027-0) и ИОЭБ СО РАН (№ 121030900138-8) с использованием оборудования ЦКП БИП СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Атажанова Г. А. Терпеноиды эфирных масел растений. М.: ICSPF, 2008. 288 с.
- Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Высочина Г. И. Биохимические подходы к познанию разнообразия растительного мира // Сиб. экол. журн. 1999. Т. 6, № 3. С. 207–211.
- Гельман Э., Хилл Д., Вехтари А. Регрессия: теория и практика. С примерами на R и Stan / пер. с англ. В. С. Яценкова. М.: ДМК Пресс, 2022. 748 с.
- Данилова Н. С., Борисова С. З., Иванова Н. С. Краткий обзор полыней Центральной Якутии // Вестн. Сев.-Вост. фед. ун-та им. М. К. Аммосова. 2011. № 1. С. 11–16.
- Дыленова Е. П., Жигжитжапова С. В., Рандалова Т. Э., Раднаева Л. Д. Компонентный состав эфирного масла восточно-сибирского эндемика *Artemisia jacutica* Drob. // IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием “Разнообразие почв и биоты Северной и Центральной Азии”. 15–18 июня, 2021 г. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2021а. С. 150–152.
- Дыленова Е. П., Жигжитжапова С. В., Рандалова Т. Э., Раднаева Л. Д. Низкомолекулярные метаболиты *Artemisia jacutica* Drob. // Сб. материалов юбил. междунар. науч. конф. “90 лет – от растения до лекарственного препарата: достижения и перспективы”. 10–11 июня 2021 г. М.: Изд-во ФГБНУ ВИЛАР, 2021. С. 407–412.
- Жигжитжапова С. В., Намзалов Б.-Ц. Б., Раднаева Л. Д. Состав эфирного масла *Artemisia gmelinii* Web. ex Stechm. Приольхонья (оз. Байкал) // Сиб. экол. журн. 2021. Т. 28, № 1. С. 91–100. [Zhigzhitzhapova S. V., Namzalov B.-Ts. B., Radnaeva L. D. Composition of Essential Oil of *Artemisia gmelinii* Web. ex Stechm. of Priolkhonian Flora (Lake Baikal) // Contemporary Problems of Ecology. Vol. 14, N 1. 2021. P. 71–78].
- Журавская А. Н., Стогний В. В., Кершенгольц Б. М. Зависимость радиочувствительности семян растений от экологических условий произрастания // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. № 5. С. 531–539.
- Калинкина Г. И., Березовская Т. П., Дмитрук С. Е., Сальникова Е. Н. Перспективы использования в медицинской практике эфирно-масличных растений флоры Сибири // Химия раст. сырья. 2000. № 3. С. 5–12.
- Определитель растений Бурятии / О. А. Аненхонов, Т. Д. Пыхалова, К. И. Осипов, И. Р. Сэкулич, Н. К. Бадмаева, Б. Б. Намзалов, Л. В. Кривобоков, М. С. Мункуева, А. В. Суткин, Д. Б. Тубшинова, Д. Я. Тубанова. Улан-Удэ: Изд-во “Республиканская типография”, 2001. 672 с.

- Саратиков А. С., Прищеп Т. П., Венгерский А. И., Березовская Т. П., Калинин Г. И., Серых Е. А. Противовоспалительные свойства эфирных масел тысячелистника азиатского и некоторых видов полыни // Хим.-фармацевт. журн. 1986. Т. 20, № 5. С. 585–588.
- Титлянова А. А., Базилевич Н. И., Снытко В. А., Дубынина С. С., Копотева Т. А., Магомедова Л. Н., Мироничева-Токарева Н. П., Нефедьева Л. Г., Семенов Н. В., Тишков А. А., Гран Т. И., Хакимзянова Ф. И., Шатохина Н. Г., Шмакова Е. И. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 134 с.
- Ткачев А. В. Исследование летучих веществ растений. Новосибирск, 2008. 969 с.
- Ткачев А. В., Прокушева Д. Л., Домрачев Д. В. Дикорастущие эфирномасличные растения Южной Сибири. Новосибирск: Издательство ООО “Офсет-ТМ”, 2017. 575 с.
- Флора Сибири. Т. 13: Asteraceae (Compositae) / сост. И. М. Красноробов, М. Н. Ломоносова, Н. Н. Тупицына и др. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1997. 472 с.
- Ханина М. А., Серых Е. А., Амельченко В. П., Покровский Л. М., Ткачев А. В. Результаты интродукционного исследования полыни якутской *Artemisia jacutica* Drob. // Химия раст. сырья. 1999. № 3. С. 63–78.
- Ханина М. А., Серых Е. А., Березовская Т. П., Хан В. А. Эфирные масла полыней секции *Absinthium* DC. // Химия природ. соединений. 1992. № 2. С. 283–284.
- Ханина М. А., Серых Е. А., Покровский Л. М., Ткачев А. В. Новые данные по химическому составу эфирного масла *Artemisia absinthium* L. сибирской флоры // Химия раст. сырья. 2000. № 3. С. 33–40.
- Arino A., Arberas I., Renobales G., Arriaga S., Domingues J. B. Seasonal variation in wormwood (*Artemisia absinthium* L.) essential oil composition // J. Essential Oil Research. 1919. Vol. 11, N5. P. 619–622.
- Babaei K., Mohammad M., Farhadi N., Pirbalouti A. G. Morphological, physiological and phytochemical responses of Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) to drought stress // Scientia Horticulturae. 2021. Vol. 284. 110116.
- del Grosso S., Parton W., Stohlgren Th., Zheng D., Bachellet D., Prince S., Hibbard K., Olson R. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature // Ecology. 2008. Vol. 89. N8. P. 2117–2126.
- Dylenova E. P., Randalova T. E., Tykheev Zh. A., Zhigzhitzhapova S. V., Radnaeva L. D. *Artemisia jacutica* Drob. as the source of terpenoids // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2019. Vol. 320, N 1. 012054.
- Dylenova E. P., Zhigzhitzhapova S. V., Radnaeva L. D., Randalova T. E. The essential oil composition of *Artemisia jacutica* Drob. from the flora of Buryatia, Russia // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2021. Vol. 908, N 1. 012031.
- Forni C., Duca D., Glick B. R. Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria // Plant Soil. 2017. Vol. 410. P. 335–356. doi 10.1007/s11104-016-3007-x
- Frank D. A. Drought effects on above- and belowground production of a grazed temperate grassland ecosystem // Oecologia. 2008. Vol. 1526 N 1. P. 131–139.
- Mandoulakani B. A., Eyvazpour E., Ghadimzadeh M. The effect of drought stress on the expression of key genes involved in the biosynthesis of phenylpropanoids and essential oil components in basil (*Ocimum basilicum* L.) // Phytochemistry. 2017. Vol. 139. P. 1–7.
- Mohammadi H., Ghorbanpour M., Brestic M. Exogenous putrescine changes redox regulations and essential oil constituents in field-grown *Thymus vulgaris* L. under well-watered and drought stress conditions // Industrial Crops and Products. 2018. Vol. 122. P. 119–132.
- Pena E. A., Slate E. H. Global Validation of Linear Model Assumptions // J. Am. Stat. Assoc. 2006. Vol. 101, N 473. P. 341–354.
- Radwan A., Kleinwachter M., Selmar D. Impact of drought stress on specialised metabolism: Biosynthesis and the expression of monoterpene synthases in sage (*Salvia officinalis*) // Phytochemistry. 2017. Vol. 141. P. 20–26.
- Svoboda M., Fuchs B. A. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP): Handbook of Drought Indicators and Indices. Geneva: Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines, 2016. Series 2. 60 p.
- Verma N., Shukla S. Impact of various factors responsible for fluctuation in plant secondary metabolites // J. Appl. Res. Med. and Aromatic Plants. 2015. Vol. 2, N 4. P. 105–113.
- Zhigzhitzhapova S. V., Dylenova E. P., Gulaev S. M., Randalova T. E., Taraskin V. V., Tykheev Zh. A., Radnaeva L. D. Composition and antioxidant activity of the essential oil of *Artemisia annua* L. // Nat. Product Res. 2020. Vol. 34, N 18. P. 2668–2671.
- Zhigzhitzhapova S. V., Radnaeva L. D., Gao Q. B., Chen S. L., Zhang F. Q. Chemical composition of volatile organic compounds of *Artemisia vulgaris* L. (Asteraceae) from the Qinghai-Tibet Plateau // Industrial Crops and Products. 2016. Vol. 83. P. 462–469.
- Zhigzhitzhapova S. V., Randalova T. E., Radnaeva L. D., Anenkhonov O. A., Zhang F. Comparative studies on composition of essential oil in three wormwoods (*Artemisia* L.) from Buryatia and Mongolia // J. Essential Oil Bearing Plants. 2015. Vol. 18, N 3. P. 637–641.
- Zhigzhitzhapova S. V., Randalova T. E., Radnaeva L. D., Dylenova E. P., Chen S. L., Zhang F. Q. Chemical composition of essential oils of *Artemisia frigida* Willd. grown in the North and Central Asia // Journal of Essential Oil Bearing Plants. 2017. Vol. 20, N 4. P. 915–926.

The influence of climatic conditions on the essential oil composition of *Artemisia jacutica* (Asteraceae)

E. P. DYLENOVA¹, S. V. ZHIGZHITZHAPOVA¹, B. V. ZHIGZHITZHAPOV¹,
B. M. ZHIGMITTCYRENOVA¹, A. S. TARASKINA¹, O. A. ANENKHONOV²

¹*Baikal Institute of Nature Management SB RAS (BINM SB RAS)
670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy str., 6
E-mail: edylenova@mail.ru*

²*Institute of General and Experimental Biology SB RAS (IGEB SB RAS)
670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy str., 6
E-mail: anen@yandex.ru*

Artemisia jacutica Drob. is an East Siberian endemic, biennial plant. It is distributed within the Republic of Sakha-Yakutia and the South of Central Siberia. The typical habitats are saline mesic and semi-dry meadows, steppes, salt marsh, abandoned fields and ruderal habitats. The south-eastern border of the species area of distribution is located in Buryatia. The essential oils were obtained by hydrodistillation from air-dry raw materials in the year of collection. The composition of the essential oils was analyzed by chromatomass spectrometry. The main component of the essential oils of *A. jacutica* was chamazulene, which showed anti-inflammatory effect. According to the literature and own data it was found that the formation of essential oils' composition was influenced by climatic conditions, which, obviously, provided the best adaptation of plants to environmental conditions. Climatic conditions determined the composition of essential oils of *A. jacutica*, resulting to the formation of two chemotypes – “Buryat” and “Yakut”. It has been established that the formation of these chemotypes generates due to differences in the level of heat and moisture supply of habitats, which is expressed by the hydrothermal coefficient (HTC). The temperature-humidity extremeness coefficient calculated on the basis of annual data influenced the ratio of components in the essential oils in a greater degree. Climatic factors (air temperature, precipitation, etc.) and their integral characteristics affected the content of individual components in the essential oils directly or in combination with each other, enhancing or diluting the influence of each other.

Key words: *Artemisia jacutica*, essential oils, chemotype, component composition, climatic parameters, hydrothermal coefficient, temperature-humidity extremeness coefficient.