

Ботанические исследования

УДК 582.675.1:551.583(571.56)(045)

Н.С. Данилова, С.Н. Андреева, Д.Н. Андросова, С.З. Борисова, Н.Н. Егорова, А.Н. Петрова, О.В. Юдина

ФЕНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ СЕМ. RANUNCULACEAE НА РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ¹

В условиях меняющегося климата важным моментом является изучение фенологии растений. Цель работы – анализ региональных изменений климата за последние 60 лет в Центральной Якутии и фенологического отклика 4 видов травянистых растений местной природной флоры (*Pulsatilla angustifolia*, *Adonis sibirica*, *Delphinium grandiflorum* и *Aconitum barbatum*) на эти события. В температурном режиме г. Якутска за 1961–2021 гг. отмечен статистически значимый положительный тренд – средняя температура воздуха безморозного периода повысилась на 1,4 °С, вегетационного – на 0,9 °С и летнего – на 1,2 °С. Среднее годовое количество осадков за этот период существенно не изменилось. Потепление привело к незначительным фенологическим смещениям в сезонном развитии растений, различным по продолжительности и направленности. Более раннее наступление сроков фенологических фаз отмечается в начале вегетации, причем достоверный сдвиг отмечен только в сроках весеннего отрастания *A. sibirica* ($p = 0,0314$). У трех видов отмечено смещение конца вегетации на более поздние даты. Конец вегетации коротковегетирующего гемизфемероида *A. sibirica* сдвинулся на более ранние даты. Не выявлено существенных различий в продолжительности префлорального периода, что обусловлено, в большей степени, биологическими особенностями вида, нежели экологическими факторами. Изменения в длительности вегетации более заметны, хотя p -значения выше уровня значимости ($p = 0,1–0,8$). Достоверно увеличение длительности вегетации только у *A. barbatum* ($p = 0,04$). В этом небольшом смещении дат наступления основных фенологических фаз проявляется инерционность фенологического отклика растений на региональные изменения климата.

Ключевые слова: Ranunculaceae, изменение климата, температура воздуха, сумма осадков, многолетние фенологические наблюдения, фенологическая реакция, Центральная Якутия.

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-1-32-42

В конце 20 века зафиксировано глобальное изменение климата. При всех общих тенденциях этот процесс проявляет значительную пространственную неоднородность и имеет свои региональные особенности. Особенно резкие климатические изменения проявляются в Северном полушарии, скорость современного роста осредненной по России среднегодовой температуры за 10 лет составляет 0,49 °С, что более чем в 2,5 раза выше скорости роста глобальной средней температуры [1].

Изменение климата влияет на многие стороны растительного мира, и в первую очередь нарушается обычный ход сезонных ритмов развития растений. Многие авторы отмечают сдвиги в фенологическом развитии растений, в большей части, в сторону опережения обычных сроков, меньшей – в сторону запаздывания [2–6]. Нежелательным эффектом изменения климата могут явиться инвазии, проникновение чужеродных видов в природные ценозы [7]. Исходя из прогнозируемых трендов потепления климата и аридизации, в будущем может наблюдаться снижение видового разнообразия как для травянистых экосистем, так и для видов с узким ареалом [8]. Изменение климата также может изменить характер взаимодействия между растениями, их опылителями и травоядными животными [9]. Поэтому возрастает значимость изучения реакции растительного мира на климатические изменения.

Цель работы: анализ изменений температурного и влажностного режима вегетационного периода за последние 60 лет в Центральной Якутии и связь фенологического развития травянистых растений местной природной флоры с этими событиями.

Материалы и методы исследований

В работе использованы архивные материалы Якутского ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (ЯБС). Фенологические наблюдения проводились на базе

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-24-20099).

коллекции природной флоры. Сад расположен на второй надпойменной террасе р. Лены, в 7 км к юго-западу от г. Якутска (Центральная Якутия). Климат района резко континентальный, характеризующийся низкими температурами зимой и высокими – летом (годовая амплитуда температуры воздуха составляет 102 °С), а также засушливостью [10].

Материалом для анализа климатических показателей служили данные гидрометеостанции г. Якутска за 1961–2021 гг.

Фенологические сезоны определяются устойчивым переходом среднесуточных температур через установленные пределы. Наступление фенологической весны происходит с момента устойчивого перехода температуры воздуха в 13 ч. через 0 °С, лета – с переходом среднесуточной температуры воздуха выше 10 °С, осени – ниже 10 °С, наступление фенологической зимы определяется переходом температуры воздуха в 13 ч. через 0 °С. С устойчивым переходом среднесуточной температуры через 5 °С связано начало вегетационного периода. Даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0, 5 и 10 °С определены по единой методике агрометеорологических станций и постов [11]. Сравнительный анализ метеоусловий фенологических сезонов 1961–2021 гг. проводили по следующим датам: начало оттепели, наступление последнего весеннего и первого осеннего заморозков, устойчивый переход среднесуточных температур воздуха через 0, 5 и 10 °С, продолжительность периодов с температурами выше 0, 5 и 10 °С, сумма температур для каждого фенологического сезона, сумма осадков, гидротермический коэффициент (ГТК) по Селянинову.

Объектами исследований служили 4 вида сем. Ranunculaceae: *Pulsatilla angustifolia* Turcz., в коллекции с 1966 г., *Adonis sibirica* Patr. – с 1970 г., *Delphinium grandiflorum* L. – с 1966 г. и *Aconitum barbatum* Pers. – с 1967 г. Фенологические наблюдения проводились по методике И.Н. Бейдемана [12] в течение 50–55 лет. Анализировались даты наступления следующих фенологических фаз: весеннее отрастание (ВО), начало цветения (НЦ) – момент перехода вегетативных фаз к генеративным, конец вегетации (КВ) – осеннее отмирание, а также продолжительность префлорального (ПП) и вегетационного периодов (ПВ) (в днях).

При обработке данных фенологических и метеорологических наблюдений использованы следующие методы статистического анализа с применением пакетов программ MS Excel и Statistica 8.0: проверка нормальности распределения переменных при помощи критерия Колмогорова – Смирнова с поправкой Лиллиефорса и критерия Шапиро – Уилка, проверка равенства средних двух независимых выборок с помощью t-критерия Стьюдента и критерия U Манна – Уитни, линейный регрессионный анализ, ранговый корреляционный анализ. Для приведенных в таблицах показателей приняты следующие обозначения: \bar{M} – среднее значение показателя, σ – стандартное отклонение, p – достигнутый уровень значимости. Критический уровень значимости принимался равным 5 %.

Результаты и их обсуждение

На протяжении исследованных 60 лет с 1961 по 2021 гг. среднегодовая температура воздуха в г. Якутске существенно изменилась (табл. 1). В первые пятилетия наблюдений средняя температура воздуха близка к норме, крайние значения в этот период не выходили за пределы 4 градусов в ту или иную сторону. Начиная с пятилетия 1986–1990 гг. и далее, наметилась тенденция к потеплению, когда среднегодовая температура повысилась на 1,2 °С по сравнению со средними многолетними значениями. Как известно, с наступлением 21 века отмечена пауза в глобальном потеплении [13]. Но эта «приостановка» роста средней глобальной приземной температуры в показателях г. Якутска не проявилась, наоборот, наблюдалось устойчивое её повышение, среднегодовое значение температуры за 30 лет с 1991 по 2021 гг. повысилось по сравнению с предыдущим циклом на 2 °С и составило –7,9 °С. Среднегодовая температура достигла своего максимума –6,9 °С в 2016–2021 гг., превышение над средними многолетними данными в эти годы составило +3,4 °С. При этом основной вклад в это внесло повышение температур за холодную часть года, степень потепления за зимние месяцы намного превосходит таковую за летние (табл. 1).

Поскольку наши исследования связаны с растениями, с их фенологическим развитием, основной интерес для ботанического изучения представляют погодные условия безморозного периода (табл. 2).

В температурном режиме теплой части года за 60 лет наблюдений также отмечен статистически значимый положительный тренд (рис. 1). Средняя температура воздуха безморозного периода повысилась на 1,4 °С, вегетационного – 0,9 °С и летнего сезона – 1,2 °С.

Таблица 1

Средняя месячная и годовая температура воздуха г. Якутска

Месяц	Средняя температура воздуха, °С				Многолетняя*
	Период, гг.				
	1961–1990	1991–2021	2016–2021	1961–2021	
I	–40,9	–37,2	–36,4	–39,0	–43,2
II	–35,9	–32,9	–31,7	–34,4	–35,9
III	–21,6	–19,1	–16,4	–20,3	–22,2
IV	–6,1	–3,8	–2,1	–4,9	–7,4
V	6,7	8,1	8,6	7,4	5,7
VI	15,4	17,2	18,4	16,3	15,4
VII	18,7	19,9	19,9	19,3	18,7
VIII	14,9	15,7	15,9	15,3	14,8
IX	5,7	6,4	7,3	6,0	6,2
X	–8,6	–6,8	–5,4	–7,7	–7,9
XI	–29,2	–25,8	–23,9	–27,5	–28,0
XII	–38,8	–37,0	–37,1	–37,9	–39,8
Многолетняя	–9,9	–7,9	–6,9	–8,9	–10,3

Примечание: * – по М.Г. Гавриловой [10].

Таблица 2

Агрометеорологические условия г. Якутска

Показатели	1882–1960*	1961–1990	1991–2021	<i>t</i>	<i>p</i>
Оттепель, дата	–	19.04±8	15.04±9	1,73	0,088
Последний заморозок в воздухе, дата	30.05	5.05±8	29.04±7	3,50	0,001
Начало весны, дата	1.05	27.04±9	25.04±7	1,12	0,266
Продолжительность весны, дни	–	30±10	29±8	0,52	0,606
Начало вегетационного периода, дата	13.05	12.05±7	6.05±6	3,39	0,001
Конец вегетационного периода, дата	19.09	16.09±7	19.09±6	–1,71	0,092
Продолжительность вегетационного периода, дни	127	129±10	137±9	–3,42	0,001
Начало лета, дата	28.05	27.05±7	23.05±7	2,04	0,046
Продолжительность лета, дни	98	101±10	104±10	–1,40	0,165
Начало осени, дата	5.09	5.09±7	5.09±6	–0,09	0,932
Продолжительность осени, дни	–	25±8	27±8	–1,15	0,254
Продолжительность безморозного периода, дни	154	156±11	160±9	–1,48	0,144
Окончание безморозного периода, дата	3.10	30.09±5	1.10±5	–1,24	0,222
Первый заморозок в воздухе, дата	3.09	26.09 ± 6	30.09±6	–2,74	0,008
Сумма температур выше 0°С	1867	1911±118	2088±124	–5,73	0,000
Сумма эффективных температур (выше +5 °С)	1795	1813±139	2001±123	–5,61	0,000
Сумма активных температур (выше +10 °С)	1565	1575±168	1730±179	–3,48	0,001
Сумма осадков за безморозный период, мм	–	167±39	164±43	0,28	0,778
Гидротермический коэффициент (ГТК)	–	1,05±0,29	0,93±0,28	1,62	0,111

Примечание: * – по данным справочников [14–16]. Жирным шрифтом обозначены статистически значимые различия при $p < 0,05$.

Суммарные значения количества осадков, выпавших с мая по октябрь за годы исследования 1961–2021 гг., не претерпели существенных изменений. Наблюдается незначительное увеличение среднегодовых значений суммы осадков теплого времени года на 7,1 мм, средние 5-летние значения выпавших осадков за вегетационный период повысились на 16,4 мм, летних месяцев – на 10 мм (рис. 2).

Соотношение температурно-влажностных условий демонстрирует значение гидротермического коэффициента, среднемесячный показатель которого за исследуемые годы варьирует в пределах 0,4–0,8. Не выявлено тенденции к его повышению даже на фоне небольшого увеличения количества

осадков, что объясняется интенсивным повышением температуры, снижающим этот положительный эффект (рис. 3).

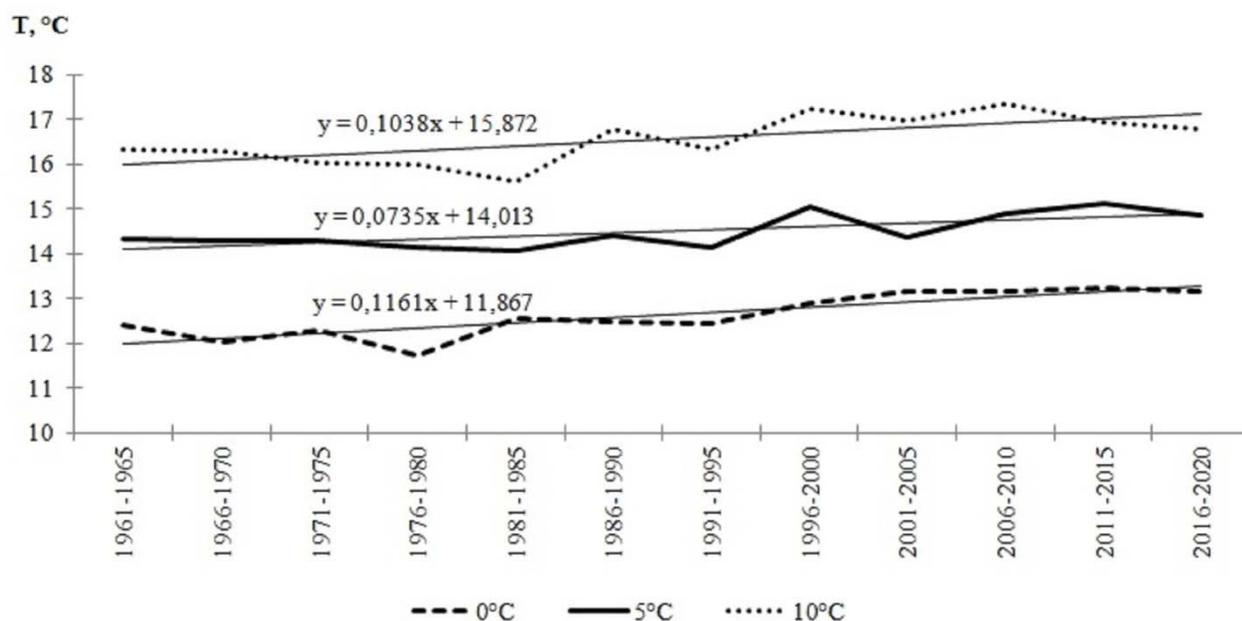


Рис. 1. Средняя температура воздуха весны (выше 0 °С), вегетационного периода (выше +5 °С) и лета (выше +10 °С) за 5-летние периоды

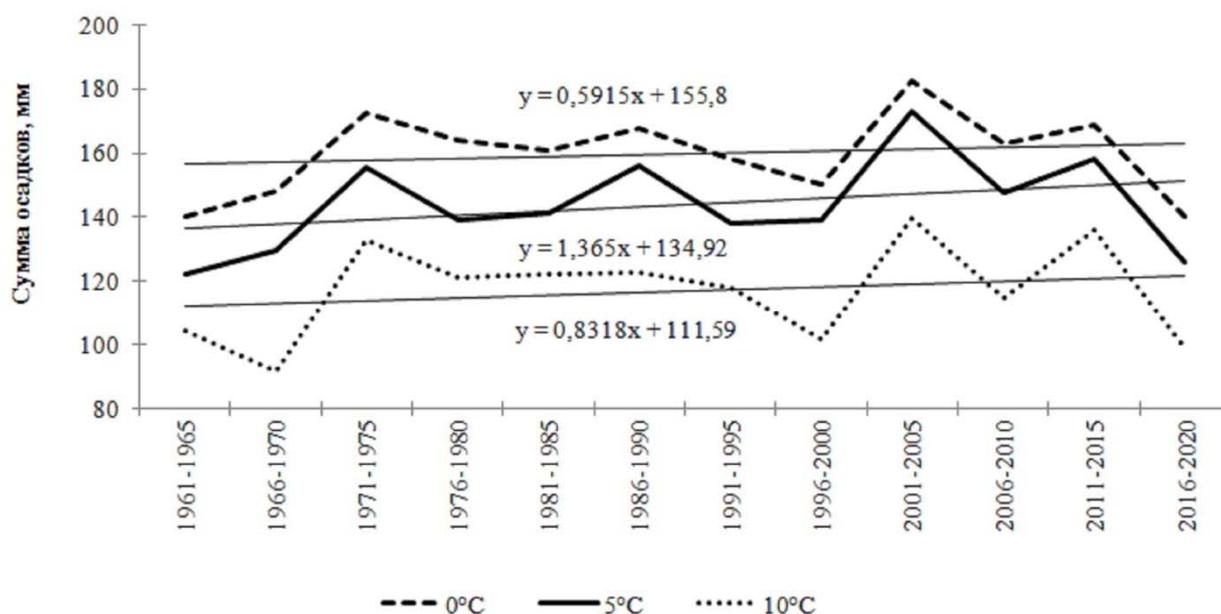


Рис. 2. Сумма осадков весны (выше 0 °С), вегетационного периода (выше +5 °С) и лета (выше +10 °С) за 5-летние периоды. Прямая линия – линейный тренд

Сравнивая климатические показатели 30-летних (1961–1990 гг. и 1991–2021 гг.) периодов в г. Якутске, можно отметить некоторые изменения, произошедшие за 60 лет. Отмечаются более ранние сроки прекращения весенних заморозков ($p = 0,001$) и более поздние сроки наступления осенних заморозков ($p = 0,008$). Но при этом средние даты перехода температуры через 0 °С за два 30-летних периода отмечаются примерно в одни и те же сроки во второй декаде апреля ($27,04 \pm 9$ и $25,04 \pm 7$ соответственно), остается стабильной и средняя продолжительность этого периода (фенологической весны) (30 ± 10 и 29 ± 8 дней). Но даты устойчивого перехода среднесуточной температуры через 5 и 10 °С

в 1991–2021 гг. сместились на более ранние сроки, с опережением на 6 и 4 дня соответственно ($p = 0,001$ и $p = 0,046$), что обусловило увеличение продолжительности вегетационного периода ($p = 0,001$). Расхождение за 60 лет по этому показателю за два исследуемых 30-летних периода составляет 8 дней. Удлинение вегетационного сезона сопровождается статистически значимым увеличением сумм температур воздуха выше 0, 5 и 10 °С. При этом продолжительность безморозного периода и фенологических сезонов остается относительно стабильной (табл. 2).

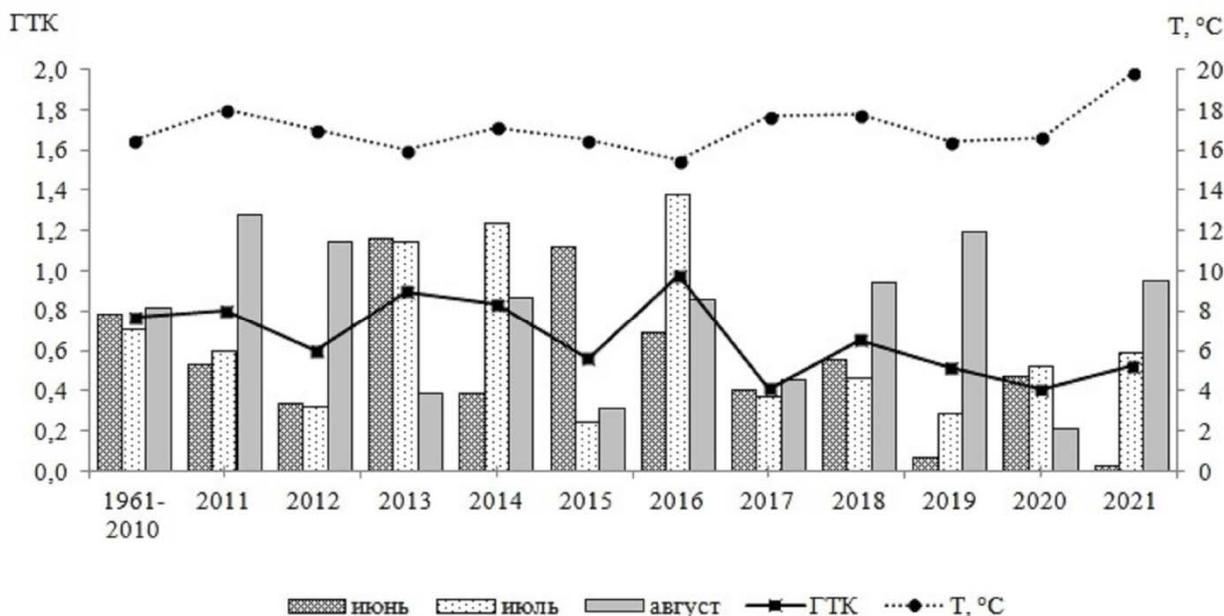


Рис. 3. Гидротермический коэффициент летнего сезона

Объекты исследования различаются по срокам цветения. Ранневесеннецветущее растение *Pulsatilla angustifolia* цветет сразу после схода снега в первой половине мая, и первые фазы его весеннего развития протекают очень сжато. Одним из приспособлений, обеспечивающих его раннее цветение, является гистерантность – весеннее отрастание *P. angustifolia* представляет собой вынос бутонов на поверхность почвы. Цветение весеннецветущего *Adonis sibirica* наблюдается на 13–16 дней позже, чем у *P. angustifolia*. Летнецветущие *Delphinium grandiflorum* и *Aconitum barbatum* цветут в первой и второй половине июля соответственно. Кроме *A. sibirica*, являющимся гемизфермероидом, остальные виды обладают весенне-летнезеленым феноритмотипом. Все виды высокоустойчивы в культуре, ежегодно проходят полный цикл фенологического развития, дают полноценное потомство, способны к самовозобновлению.

При изучении зависимостей фенологического развития растений от метеоусловий у раннецветущих видов *P. angustifolia* и *A. sibirica* выявлена положительная корреляция даты весеннего отрастания с датами схода снега ($r_s = 0,54$ и $r_s = 0,53$). При этом отмечается более раннее весеннее отрастание этих видов на крутых степных южных склонах коренного берега р. Лены, где снег сходит значительно раньше, чем в интродукционном питомнике, расположенном на долинном участке. Слабая зависимость от других весенних метеорологических явлений свидетельствует об устойчивости весеннецветущих видов к низким температурам начала сезона. В отличие от них, сроки весеннего отрастания летнецветущих *D. grandiflorum* и *A. barbatum* более зависимы от климатических факторов – оттепели, последних заморозков, схода снега, даты перехода среднесуточной температуры воздуха через 5 °С. Имеется слабая зависимость сроков отрастания *A. barbatum* от сумм температур выше 5 °С в течение весны, раннецветущие виды, как более адаптированные к низким температурам, не проявляют зависимости от этого показателя. Низкая корреляция сроков весеннего отрастания всех видов с выпавшими осадками и значениями ГТК свидетельствует об устойчивости изученных степных видов к засушливым условиям Центральной Якутии (рис. 4).

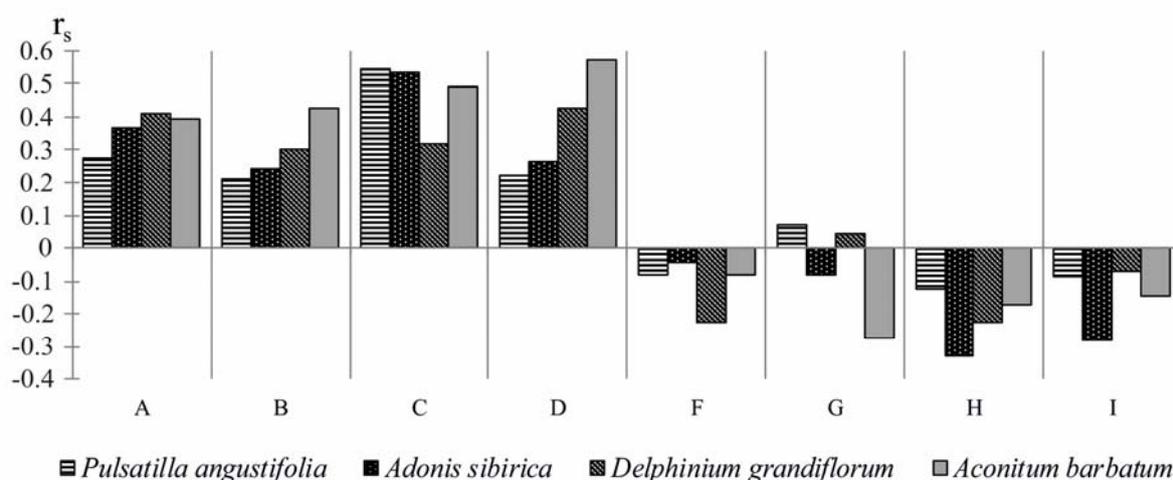


Рис. 4. Корреляция дат начала вегетации с метеопказателями

Примечание: Здесь и на рис. 5: А – дата оттепели; В – дата последнего заморозка в воздухе; С – дата начала весны; D – дата начала вегетации; F – $\sum T > 5^\circ\text{C}$ годовая; G – $\sum T > 5^\circ\text{C}$ весны; H – $\sum R$; I – ГТК

Зависимость даты зацветания от сроков наступления весенних метеоявлений актуальны для видов, цветущих весной и в первой половине лета. Не выявлено зависимости сроков зацветания растений от количества осадков и суммы температур выше 5°C за весенний период, но отмечена слабая отрицательная корреляция с годовой суммой температур выше 5°C и слабая положительная зависимость даты начала цветения летнецветущих видов от ГТК (рис. 5).

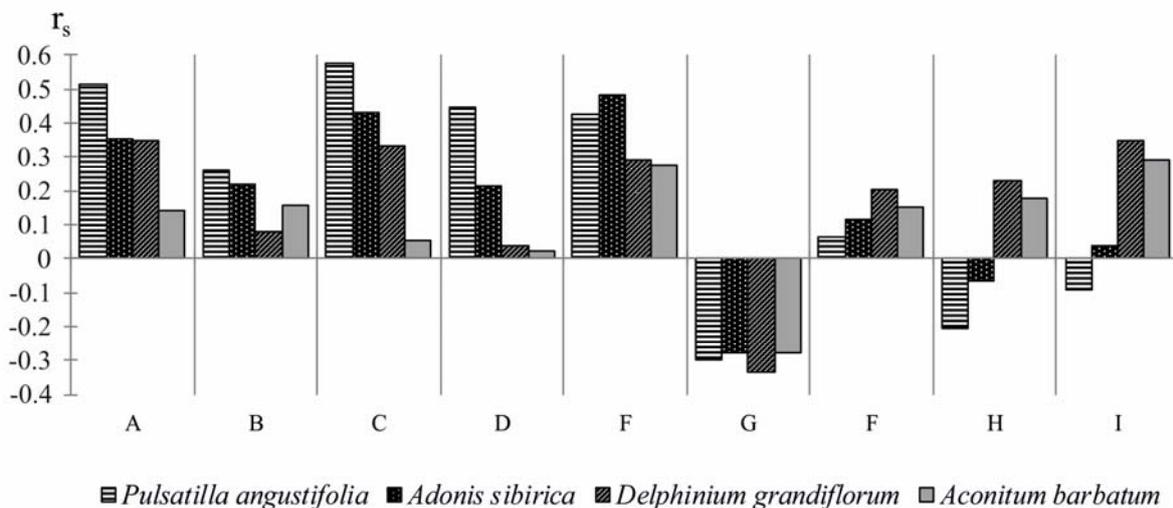


Рис. 5. Корреляция дат начала цветения с метеопказателями

Сравнивая даты наступления основных фенологических фаз за исследуемые периоды (с 1967 по 1990 гг. и с 1991 по 2021 гг.), можно отметить, что сроки весеннего отрастания всех 4 видов изменились незначительно в сторону опережения от 1 (*P. angustifolia*) до 3 дней (*A. sibirica*). Даты начала цветения изменились неоднозначно. Зацветание весенних видов сместилось на более ранние сроки, отмечено запаздывающее на 1 день цветение летнецветущего *D. grandiflorum*, дата начала цветения *A. barbatum* осталась неизменной.

Сроки конца вегетации по сравнению с предыдущими фенофазами изменились в большей степени, для трех весенне-летнезеленых видов они значительно сдвинулись в сторону запаздывания, наибольший разрыв отмечается у летнецветущих видов, менее – у весеннецветущего *P. angustifolia*. В отличие от этого, у коротковегетирующего *A. sibirica* окончание вегетации сместилось на более ранние сроки.

За сравниваемые временные отрезки не замечено существенных различий видов по продолжительности префлорального периода, обусловленного в большей степени их биологическими особенностями, нежели экологическими факторами.

Что касается длительности вегетации, то в течение 1991–2021 гг. весенне-летнезеленые растения вегетируют продолжительней. Хотя увеличение длительности вегетации достоверно только для *A. barbatum* ($p = 0,04$), это наиболее заметная реакция растений на потепление климата и, соответственно, на удлинение вегетационного периода. В то же время, по-особому проявляет себя коротковегетирующий *A. sibirica*. Неоднозначные смещения сроков наступления основных его фенофаз как в сторону опережения, так и запаздывания, обеспечили стабильность продолжительности как префлорального периода, так и в целом вегетации. Это свидетельствует об устойчивости ритмологической адаптации вида к условиям Севера (табл. 3).

Таблица 3

**Средние сроки наступления основных фенологических фаз видов Ranunculaceae
в 1967–1990 и 1991–2021 гг.**

Вид	1967–1990	1991–2021	Уэксп.	Укр.	p
Начало вегетации					
<i>Pulsatilla angustifolia</i>	01.05±6	30.04±5	246	189	0,6646
<i>Adonis sibirica</i>	06.05±5	03.05±4	187,5	212	0,0314
<i>Delphinium grandiflorum</i>	11.05±7	09.05±4	226	189	0,3859
<i>Aconitum barbatum</i>	12.05±6	10.05±4	246,5	234	0,1529
Начало цветения					
<i>Pulsatilla angustifolia</i>	13.05±7	11.05±4	280	255	0,2243
<i>Adonis sibirica</i>	28.05±13	24.05±5	263,5	212	0,5378
<i>Delphinium grandiflorum</i>	01.07±8	02.07±9	198,5	154	0,5762
<i>Aconitum barbatum</i>	14.07±7	14.07±6	257	212	0,4547
Конец вегетации					
<i>Pulsatilla angustifolia</i>	17.08±15	24.08±25	119,5	88	0,5752
<i>Adonis sibirica</i>	02.08±18	24.07±20	113	94	0,3062
<i>Delphinium grandiflorum</i>	11.08±13	21.08±10	16,5	17	0,0678
<i>Aconitum barbatum</i>	22.08±5	04.09±13	8,5	8	0,0780
Продолжительность префлорального периода					
<i>Pulsatilla angustifolia</i>	13±4	11±5	194,5	182	0,1666
<i>Adonis sibirica</i>	22±16	22±5	216	212	0,1150
<i>Delphinium grandiflorum</i>	51±9	54±9	196	154	0,5346
<i>Aconitum barbatum</i>	64±9	65±5	245,5	212	0,3272
Продолжительность вегетации, дни					
<i>Pulsatilla angustifolia</i>	113±12	121±25	94	72	0,4429
<i>Adonis sibirica</i>	86±18	86±22	136	94	0,8216
<i>Delphinium grandiflorum</i>	93±13	104±12	22	36	0,1898
<i>Aconitum barbatum</i>	101±10	118±14	6,5	8	0,0430

Примечание: $M \pm \sigma$ – среднее значение показателя и его стандартное отклонение. При Укр. > Уэксп. различия между показателями статистически значимы. Жирным шрифтом обозначены статистически значимые различия, при $p < 0,05$.

Но при этих незначительных усредненных смещениях за большой промежуток времени, темпы фенологического развития растений в разные годы сильно варьируют и тесно связаны с метеорологическими условиями текущего сезона. Сдвиги в ту или иную сторону наступления фенофаз в большой мере определяются температурными и влажностными факторами. Сравним сроки прохождения основных фенофаз видов в течение 2015 и 2016 гг., различающихся по погодным условиям. В 2015 г. с апреля по июнь показатели среднемесячных температур воздуха были близки к средним многолетним значениям (нормы), в июне количество выпавших осадков превысило средние многолетние показатели. Жаркий июль 2015 г. протекал на фоне крайней засушливости – осадков зарегистрировано в 3 раза меньше средних многолетних показателей, что отразилось на значении ГТК (табл. 4). Похожее соотношение температуры и количества осадков сохранилось и в августе-сентябре. В отличие от этого, в 2016 г. зарегистрирована очень ранняя весна, переход через 0 °C отмечен 15 апреля, что опережает средние многолетние данные на 16 дней, а показатели 2015 г. – на неделю. Средняя температура воздуха в апреле превысила

на 6 °С средние значения за период 1961–2021 гг. и на 7,3 °С средние многолетние показатели. При этом в апреле-мае 2016 г. осадков зафиксировано немного. Метеоусловия июня, в целом, соответствовали средним многолетним значениям. Температурные показатели июля незначительно ниже средних многолетних, но осадков выпало много больше. Средняя температура воздуха и количество осадков августа близки к средним многолетним значениям, сентябрь характеризовался как сухой (табл. 4).

Таблица 4

Метеопоказатели вегетационного периода 2015-2016 гг. в г. Якутске

Год	Показатель	Месяц					
		IV	V	VI	VII	VIII	IX
2015	Средняя температура воздуха, Т °С	-5,3	7,3	15,5	20,4	17,0	5,6
	Сумма осадков	13,0	15,6	50,2	15,0	17,1	0,7
	ГТК		1,7	1,1	0,2	0,33	0,1
2016	Средняя температура воздуха, Т °С	-0,1	7,6	16,0	18,0	13,4	6,9
	Сумма осадков	1,4	3,2	33,5	73,1	35,7	1,3
	ГТК		0,4	0,7	1,3	0,9	0,1

Соответственно, и ритм фенологического развития растений в эти два года различался. Весеннее отрастание *P. angustifolia* в 2016 г. отмечено на 5 дней раньше, чем в предыдущем, что связано с ранним переходом среднесуточных температур через 0 °С. И это опережение сохранилось в сроках зацветания вида. Подобно этому, весеннее отрастание и начало цветения *A. sibirica* в 2016 г. также отмечено раньше, чем в 2015 г. Префлоральный период у этих видов в 2016 г. удлинился на 2 дня. Начало вегетации *D. grandiflorum* отмечается в конце апреля – первой декаде мая, разница в датах его весеннего отрастания в 2015 и 2016 гг. составила 10 дней, в дальнейшем этот разрыв к началу цветения постепенно сократился до 5 дней. В опережающем фенологическом развитии *A. barbatum* в 2016 г. также сказывается влияние теплой весны, различия в датах начала цветения в 2015 и 2016 гг. составили 10 дней. Реакцией растений на жаркий и сухой июль 2015 г. явилось сокращение длительности цветения, и, хотя это привело к небольшому сближению темпов фенологического развития, межгодовой разрыв сохранялся в датах наступления последующих фенофаз (табл. 5).

Таблица 5

Сезонное развитие растений в 2015 и 2016 гг.

Вид	Год наблюдения	Фенологическая фаза				
		ВО	НЦ	КВ	ПП	ПВ
<i>Pulsatilla angustifolia</i>	2015	01.05	14.05	28.09	13	150
	2016	26.04	11.05	25.08	15	121
<i>Adonis sibirica</i>	2015	29.04	25.05	15.08	26	108
	2016	26.04	24.05	18.08	28	86
<i>Delphinium grandiflorum</i>	2015	04.05	20.06		47	
	2016	25.04	15.06	20.08	51	117
<i>Aconitum barbatum</i>	2015	07.05	18.07		72	
	2016	04.05	08.07	07.09	65	126

Примечание: Фенофаза (дата): ВО – весеннее отрастание, НЦ – начало цветения, КВ – конец вегетации; продолжительность (дни): ПП – префлоральный период, ПВ – вегетация.

Как видно, разница в прохождении определенных фаз в разные годы может составлять до 10 дней. Это говорит о пластичности растений, об их ритмологической адаптации, способности как избегать стрессовых погодных ситуаций, так и использовать благоприятные моменты.

Выводы

1. За 60 лет наблюдений среднегодовая температура в г. Якутске повысилась с -9,9 до -7,9 °С. Основной вклад в потепление внесло повышение температур за холодный период года, но в температурном режиме и теплого периода также отмечен статистически значимый положительный тренд –

средняя температура воздуха безморозного периода повысилась на 1,4 °С, вегетационного – на 0,9 °С и летнего периода – на 1,2 °С. Среднее годовое количество осадков за этот период существенно не изменилось. Повышение среднегодовых и среднемесячных температур за период в 60 лет с 1961 по 2021 гг. сопровождается увеличением продолжительности вегетационного периода на 8 дней ($p = 0,001$).

2. Потепление климата привело к незначительным фенологическим смещениям в сезонном развитии растений, различным по продолжительности и направленности. Более раннее наступление фенофаз отмечается в весенний и раннелетний период, причем достоверный сдвиг отмечен только в сроках весеннего отрастания *Adonis sibirica* ($p = 0,0314$). В сторону запаздывания сместились сроки окончания вегетации весенне-летнезеленых видов, в сторону опережения – гемизфемероида *Adonis sibirica*.

3. Сроки весеннего отрастания весеннецветущих *Pulsatilla angustifolia* и *Adonis sibirica* коррелируют только с датой схода снега, слабая зависимость их от других весенних метеорологических явлений свидетельствует об устойчивости этих видов к низким температурам. На сроки начала вегетации летнецветущих *Delphinium grandiflorum* и *Aconitum barbatum* влияют многие факторы, такие как начало оттепели, начало схода снега, заморозки, дата устойчивого перехода суточной температуры через 5 °С.

4. Зависимость даты зацветания от сроков наступления весенних метеоявлений актуальна для видов, цветущих весной (*Pulsatilla angustifolia* и *Adonis sibirica*) и в первой половине лета (*Delphinium grandiflorum*). Отмечена слабая отрицательная корреляция сроков начала цветения летнецветущих видов с годовой суммой температур выше 5 °С и слабая положительная – с гидротермическим коэффициентом.

5. Не замечено существенных различий в продолжительности префлорального периода, что обусловлено, в большей степени, биологическими особенностями вида, нежели экологическими факторами. В течение второго 30-летнего периода растения вегетируют продолжительней, хотя увеличение длительности вегетации растений (кроме *Aconitum barbatum*, $p = 0,04$) выше уровня значимости ($p = 0,1–0,8$).

6. Сопоставляя изменчивый ритм фенологического развития изученных видов в 2015 и 2016 гг. и небольшое смещение средних фенодат за 60 лет, можно говорить об инерционности фенологического отклика растений на изменения климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с.
2. Root T.L., Price J.T., Hall K.R., Schneider S.H., Rosenzweig C., Pounds J.A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants // *Nature*. 2003. N 421. P. 57–60.
3. Clark R.M., Thompson R. Predicting the impact of global warming on the timing of spring flowering // *Int. J. Climatol*. 2010. N. 30. P. 1599–1613.
4. Жмылева А.П., Карпухина Е.А., Жмылев П.Ю. Фенологическая реакция лесных растений на потепление климата: рано- и поздноцветущие виды // *Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2011. № 2. С. 5–15.
5. Фомин Э.С., Фомина Т.И. Изменение фенологии многолетних растений в Западной Сибири на фоне глобального потепления климата // *Сибирский экологический журнал*. 2021. Т. 28, № 5. С. 543–556.
6. Rosbakh S., Hartig F., Sandanov D.V., Bukharova E.V., Miller T.K., Primack R.B. Siberian plants shift their phenology in response to climate change // *Global Change Biology*. 2021. Vol. 27(18). P. 4435–4448.
7. Шефтель Б.И., Якушов В.Д. Влияние потепления климата на наземные виды средней енисейской тайги // *Сибирский экологический журнал*. 2022. Т. 29, № 1. С. 1–12.
8. Санданов Д.В., Liu Y., Wang Z., Королюк А.Ю. Древесные и травянистые растения Внутренней Азии: видовое богатство и эколого-географические особенности // *Сибирский экологический журнал*. 2020. Т. 27, № 4. С. 450–462.
9. Bertin R.I. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change // *Journal of the Torrey Botanical Society*. 2008. Vol. 135(1). P. 126–146.
10. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. Якутск: Кн. изд-во, 1973. 119 с.
11. РД 52.33.217–99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып.11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Часть 1, кн. 2. Основные агрометеорологические наблюдения. М., 2000. 284 с.
12. Бейдеман И.Н. Изучение фенологии растений // *Полевая геоботаника*. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 2. С. 333–366.

13. England M.H., McGregor S., Spence P., Meehl G.A., Timmermann A., Cai W., Gupta A.S., McPhaden M.J., Purich A., Santoso A. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // *Nature Climate Change*. 2014. Vol. 4(2). P. 222–227.
14. Агроклиматический справочник по Якутской АССР / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Якут. упр. гидрометеорол. службы. Якут. гидрометеорол. обсерватория. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1963. 145 с.
15. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Якутская АССР. Вып. 24. Кн. 1, ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л., 1966. 398 с.
16. Климат Якутска / Якутское террит. упр. по гидрометеорологии и контролю природ. среды, Якутская гидрометеорол. обсерватория; под ред. Ц.А. Швер, С.А. Изюменко. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1982. 246 с.

Поступила в редакцию 17.01.2023

Данилова Надежда Софроновна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник
E-mail: nad9.5@mail.ru

Андреева Сахая Николаевна, младший научный сотрудник
E-mail: Sandren_1601@mail.ru

Андросова Дария Николаевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник
E-mail: darija_androsova@mail.ru

Егорова Нюргюяна Назаровна, кандидат биологических наук, научный сотрудник
E-mail: nurme@mail.ru

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН
677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 41

Борисова Саргылана Захаровна, кандидат биологических наук, доцент,
начальник отдела Ботанического сада
E-mail: borisova_sz@mail.ru

Петрова Александра Николаевна, старший преподаватель
E-mail: al9@mail.ru

Юдина Оксана Вячеславовна, студент
E-mail: u.o.v.1998@gmail.com

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58

N.S. Danilova, S.N. Andreeva, D.N. Androsova, S.Z. Borisova, N.N. Egorova, A.N. Petrova, O.V. Yudina
PHENOLOGICAL RESPONSE OF SOME SPECIES OF THE FAMILY RANUNCULACEAE TO CLIMATE CHANGE IN CENTRAL YAKUTIA

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-1-32-42

The study of plant phenology is an important point in a changing climate. The purpose of these studies is to analyze regional climate changes in Central Yakutia and the phenological response of 4 species (*Pulsatilla angustifolia*, *Adonis sibirica*, *Delphinium grandiflorum* и *Aconitum barbatum*) of wild herbaceous plants to these events over the past 60 years. A statistically significant positive trend was observed in the temperature regime of Yakutsk for 1961–2021. The average air temperature of the frost-free period increased by 1,4 °C, the growing season by 0,9 °C and the summer season by 1,2 °C. The average yearly precipitation has not changed significantly during this period. The increase in air temperature has led to minor shifts in the seasonal development of plants, which vary in duration and orientation. The earlier onset of the terms of the phenological phases is noted at the beginning of the growing season, and a significant shift is noted only in the terms of the spring regrowth of *A. sibirica* ($p = 0,0314$). The shift of the dates of the end of vegetation to later dates was noted in three species. The end of the vegetation of the short-vegetating hemiephemeroid *A. sibirica* has shifted to earlier dates. There were no significant differences in the duration of the prefloral period, which is due, to a greater extent, to the biological characteristics of the species rather than environmental factors. Changes in vegetation duration are more noticeable, although p-values are higher than the significance level ($p = 0,1–0,8$). There was a significant increase in the duration of vegetation only in *A. barbatum* ($p = 0,04$). This slight shift in the dates of the onset of the main phenological phases shows the inertia of the phenological response of plants to regional climate changes.

Keywords: Ranunculaceae, climate change, air temperature, amount of precipitation, long-term phenological observations, phenological response, Central Yakutia.

REFERENCES

1. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2021 god* [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2021], Moscow, 2022, 104 p. (in Russ.).
2. Root T.L., Price J.T., Hall K.R., Schneider S.H., Rosenzweig C., Pounds J.A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants, in *Nature*, 2003, vol. 421, pp. 57-60.
3. Clark R.M., Thompson R. Predicting the impact of global warming on the timing of spring flowering, in *Int. J. Climatol.*, 2010, vol. 30, pp. 1599-1613.
4. Zhmyleva A.P., Karpukhina E.A., Zhmylev P.Yu. [Influence of climate warming on flowering time of early and lately flowering forest plants], in *Vestnik RUDN. Ser. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [RUDN Journal of Ecology and Life safety], 2011, no. 2, pp. 5-15 (in Russ.).
5. Fomin E.S., Fomina T.I. [Changes in the phenology of perennial plants in Western Siberia against the background of global climate warming], in *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2021, vol. 28, no. 5, pp. 543-556 (in Russ.).
6. Rosbakh S., Hartig F., Sandanov D.V., Bukharova E.V., Miller T.K., Primack R.B. Siberian plants shift their phenology in response to climate change, in *Global Change Biology*, 2021, vol. 27, no. 18, pp. 4435-4448.
7. Sheftel B.I., Yakushov V.D. [Influence of climate warming on terrestrial species of the middle Yenisei taiga], in *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2022, vol. 29, no. 1, pp. 1-12 (in Russ.).
8. Sandanov D.V., Liu Y., Wang Z., Korolyuk A.Yu. [Woody and herbaceous plants of Inner Asia: species richness and ecogeographic patterns], in *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2020, vol. 27, no. 4, pp. 450-462 (in Russ.).
9. Bertin R.I. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change, in *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2008, vol. 135, no. 1, pp. 126-146.
10. Gavrilova M.K. *Klimat Tsentral'noy Yakutii* [Climate of Central Yakutia], Yakutsk, 1973, 119 p. (in Russ.).
11. *RD 52.33.217-99. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vyp.11. Agrometeorologicheskie nablyudeniya na stantsiyakh i postakh. Chast' 1, kn. 2. Osnovnye agrometeorologicheskie nablyudeniya* [RD 52.33.217-99. Manual for hydrometeorological stations and posts. Issue 11. Agrometeorological observations at stations and posts. Part 1. Book 2. Basic agrometeorological observations], Moscow, 2000, 284 p. (in Russ.).
12. Beydeman I.N. *Izuchenie fenologii rasteniy* [The study of plant phenology], in *Polevaya geobotanika*, Moscow, Leningrad: AN SSSR Publ., 1960, vol. 2, pp. 333-366 (in Russ.).
13. England M.H., McGregor S., Spence P., Meehl G.A., Timmermann A., Cai W., Gupta A.S., McPhaden M.J., Purich A., Santoso A. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus, in *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 222-227.
14. *Agroklimaticheskiy spravochnik po Yakutskoy ASSR* [Agro climatic handbook on the YaASSR], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1963, 145 p. (in Russ.).
15. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Yakutskaya ASSR. Vyp. 24. Kn. 1, ch. 2. Temperatura vozdukha i pochvy* [Scientific applied handbook on the USSR climate. Yakut ASSR. Vol. 24. Book 1, part 2. Air and soil temperature], Leningrad, 1966, 398 p. (in Russ.).
16. *Klimat Yakutsk* [Climate of Yakutsk], Shver Ts.A., Izyumenko S.A. (ed), Leningrad, 1982, 246 p. (in Russ.).

Received 17.01.2023

Danilova N.S., Doctor of Biology, Professor, Chief Researcher

E-mail: nad9.5@mail.ru

Andreeva S.N., Junior Researcher

E-mail: Sandren_1601@mail.ru

Androsova D.N., Candidate of Biology, Researcher

E-mail: darija_androsova@mail.ru

Egorova N.N., Candidate of Biology, Researcher

E-mail: nurme@mail.ru

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Ammosov North-Eastern Federal University

Lenina pr., 41, Yakutsk, Russia, 677980

Borisova S.Z., Candidate of Biology, Associate professor, Head of the department

E-mail: borisova_sz@mail.ru

Petrova A.N., Senior Lecturer

E-mail: al9@mail.ru

Yudina O.V., Student

E-mail: u.o.v.1998@gmail.com

Ammosov North-Eastern Federal University

Belinskogo st., 58, Yakutsk, Russia, 677000