

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

УДК 551.586:551.32

DOI: 10.15372/KZ20220601

ИСТОЧНИКИ ПЫЛЬЦЕВЫХ ЗЕРЕН В ЗИМНИХ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКАХ
АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Н.А. Курятникова, Н.С. Малыгина

*Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия; ryabchinnatalia@gmail.com, natmgn@gmail.com*

Представлены результаты микроскопического анализа 118 проб твердых атмосферных осадков (снега), отобранных в течение холодного периода 2019–2020 гг. в трех ключевых точках, расположенных в Алтайском крае в соседних Алтае-Саянской и Тоболо-Иртышской гляциологических областях и на их границе. В 45 пробах (38 %) идентифицированы адвективные пыльцевые зерна деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp.) и трав (*Artemisia* sp., семейств Asteraceae, Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae), Fabaceae, Poaceae). Были выделены территории, с которых с воздушными массами, обуславливающими выпадение осадков в течение холодного периода года, поступали пыльцевые зерна. Адвективная пыльца полыни (*Artemisia* sp.) заносилась с территории Казахского мелкосопочника и была определена в снеге обеих гляциологических областей и на их границе. Пыльцевые зерна Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) были занесены с равнин Казахстана и частично с открытых от снега склонов гор Алтая и Среднеобской низменности. Пыльца Fabaceae была определена только в осадках Алтае-Саянской гляциологической области, в то время как пыльцевые зерна Poaceae – в осадках Тоболо-Иртышской, а в зоне контакта этих гляциологических областей пыльцы данных таксонов не обнаружено.

Ключевые слова: пыльца, зимние атмосферные осадки (снег), Алтайский край, Алтае-Саянская гляциологическая область, Тоболо-Иртышская гляциологическая область.

SOURCES OF POLLEN GRAINS IN WINTER PRECIPITATION
OF THE ALTAI REGION

N.A. Kuryatnikova, N.S. Malygina

*Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS,
Molodezhnaya str. 1, Barnaul, 656038, Russia; ryabchinnatalia@gmail.com*

The results of microscopic analysis of 118 samples of solid precipitation (snow) collected during the cold season of 2019–2020 at three key points in the neighboring Altai-Sayan and Tobol-Irtysh glaciological regions and on their border are presented. In 45 samples (38 %), advective pollen grains of trees (*Betula* sp., *Pinus* sp.) and herbs (*Artemisia* sp., families Asteraceae, Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae), Fabaceae, Poaceae) were identified. Territories from which pollen grains arrived with air masses causing precipitation during the cold season were determined. Advective pollen of wormwood (*Artemisia* sp.) was brought from the territory of the Kazakh Upland and was determined in the snow of both glaciological regions and on their border. Pollen grains of Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) were introduced from the plains of Kazakhstan and, partially, from the snow-free slopes of the Altai Mountains and from the Middle Ob Lowland. Pollen of Fabaceae family was only identified in the precipitation of the Altai-Sayan glaciological region, while pollen grains of Poaceae family were found in the precipitation of the Tobol-Irtysh region; in the border zone of the two glaciological regions, pollen grains of these taxa were not found.

Key words: pollen, winter precipitation (snow), Altai Territory, Altai-Sayan glaciological region, Tobol-Irtysh glaciological region.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное потепление в последние десятилетия привело к повсеместному сокращению объёмов криосферы и существенной потере массы ледников (за пределами Гренландии и Антарктиды), равной (220 ± 30) Гт/год (2006–2015 гг.), а также к повышению температуры многолетнемерзлых пород на (0.29 ± 0.12) °С (2007–2016 гг.)

в среднем по полярным и высокогорным регионам мира [IPCC..., 2019]. В этой связи в ближайшем будущем значительное внимание необходимо сосредоточить на исследованиях в тех регионах, где расположены разноуровневые нивально-гляциальные системы, в вещественном составе которых ведущую роль занимают льды и снежный покров,

в свою очередь чутко реагирующие на климатические изменения [Котляков, 2004]. Одним из основных методов исследований в нивально-гляциальных системах является создание реальных моделей, описывающих динамику входящих в них объектов и их взаимосвязи как друг с другом, так и с иными компонентами природной среды [Гляциологический словарь, 1984]. При данном типе моделирования используют надежные маркеры, например, пыльцевые зерна, которые отражают взаимосвязь элементов в исследуемой нивально-гляциальной системе не только между собой, но и с природными системами того же или смежного иерархического уровня. Это связано с тем, что пыльца характеризуется высокой сохранностью, так как имеет устойчивую к внешним воздействиям оболочку, а пыльцевые спектры уже зарекомендовали себя как надежные индикаторы палеоэкологических и палеоклиматических событий, происходящих в том числе и в криосфере [Festi et al., 2017; Brugger et al., 2018].

В криосфере пыльцевые зерна поступают из биосферы, преимущественно через атмосферу, в результате процессов седиментации (сухое осаждение) или внутриоблачного и подоблачного вымывания (мокрое осаждение). При этом вклад сухого осаждения в общий процесс поступления частиц биологического происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность в умеренных широтах может составлять всего 10–20 % [Ивлев, 1999], а его учет более важен при локальных исследованиях, так как в региональных и глобальных масштабах вклад сухого осаждения зачастую нивелируется [Fröhlich-Nowoisky et al., 2016]. При влажном осаждении снег вымывает аэрозоли (включая пыльцевые зерна) в 3–4 раза эффективнее, чем дождь [Семенченко, 2002]. Однако исследования, посвященные анализу поступления и осаждения пыльцевых зерен с атмосферными осадками, особенно выпадающими в виде снега, немногочисленны и локализованы [Malygina et al., 2018; Kasprzyk, Borycka, 2019].

На территории Польши такие работы были эпизодичны и проводились только в период снегопада (март 2018 г.), когда отмечалось цветение *Alnus* sp. – одного из аллергенных растений Европы [Kasprzyk, Borycka, 2019]. В Алтайском крае исследования поступления пыльцевых зерен со снегом проводили в течение холодного периода 2014–2015 гг., когда полностью отсутствовала вегетация. При этом в отобранных пробах были идентифицированы пыльцевые зерна *Betula* sp., *Populus* sp., *Pinus* sp. и *Salix* sp. и определены основные районы, с территории которых эти зерна могли поступать в результате вторичного подъема с подстилающей поверхности [Malygina et al., 2018]. В продолжение этой работы авторами были выбраны три ключе-

вые точки (КТ) исследования, расположенные на удалении порядка 300 км друг от друга в смежных иерархических единицах гляциологического районирования. Данное районирование [Атлас..., 1997], по сути, является физико-географическим, где на первом плане стоят гляциальные ландшафты, а при выделении структурных единиц учитываются атмосферная циркуляция (для провинций) и особенности макрорельефа (для областей).

Ключевые точки исследования расположены в Алтайском крае (рис. 1) в соседних иерархических единицах гляциологического районирования и на их стыке и характеризуются различными синоптическими условиями вследствие дифференциации количества солнечной радиации и режимов циркуляции атмосферы [Харламова, 2013], что отражается в растительном покрове территорий. КТ № 1 расположена в Алтае-Саянской области Атлантико-Североевразийской гляциологической провинции [Атлас..., 1997] на высоте 244 м над ур. моря, где основная площадь занята зональной лесостепной растительностью, большая часть которой переведена в пахотные земли. В пределах долинно-балочных систем представлены луговые разнотравно-злаковые степи и злаково-разнотравные остепненные луга, осиново-березовые балочные леса, настоящие и заболоченные луга, по террасам Оби – сосновые боры и смешанные леса [Винокуров, Цимбалей, 2016; Ландшафтная карта..., 2016]. КТ № 2 расположена в Тоболо-Иртышской области Атлантико-Евразийской провинции на высоте 186 м над ур. моря в подзоне умеренно засушливой степи степной зоны Алтайского края. Зональная степная растительность почти полностью уничтожена распашкой. По неудобьям сохранились богато разнотравно-дерновинно-злаковые степи, осиново-березовые колки, солонцово-солончаковые комплексы, по днищу Касмалинской ложбины древнего стока – сосновые боры и смешанные леса.

КТ № 3 находится на границе Тоболо-Иртышской и Алтае-Саянской гляциологических областей на высоте 181 м над ур. моря в северо-западной части подзоны средней лесостепи лесостепной зоны Алтайского края. Большая часть зональной лесостепной растительности замещена пашнями. По долинам, логам и балкам распространены луговые разнотравно-злаковые степи и злаково-разнотравные остепненные луга, осиново-березовые балочные леса, настоящие и заболоченные луга, по террасам Оби – сосновые боры и смешанные леса.

Основной целью настоящей работы стало изучение таксономического разнообразия пыльцевых зерен в снеге, выпадавшем не только в соседних гляциологических областях (Алтае-Саянской и Тоболо-Иртышской), но и в зоне их

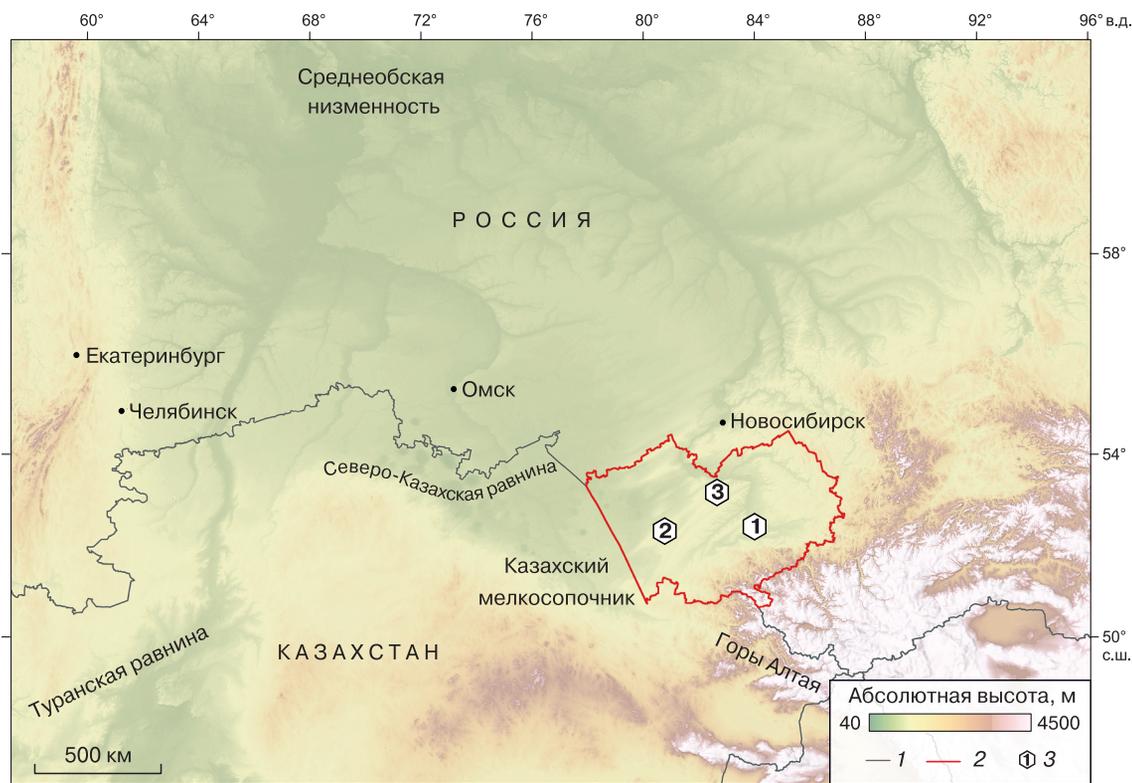


Рис. 1. Местоположение ключевых точек.

1 – государственные границы; 2 – граница Алтайского края; 3 – ключевая точка.

контакта, а также определение районов, с территорий которых с осадками поступали адвективные пыльцевые зерна, для оценки возможности их дальнейшего использования в качестве маркеров процессов поступления вещества в нивально-гляциальные системы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробоотбор и микроскопический анализ атмосферных осадков

Пробы снега, непосредственно после окончания каждого события его выпадения, отбирали в цилиндрические пробоотборники объемом, вмещающим не менее максимального среднесуточного количества атмосферных осадков. Перед использованием пробоотборники предварительно отмывали дистиллированной водой и устанавливали непосредственно перед началом выпадения осадков. После окончания снегопада полученные образцы из пробоотборника ссыпали в полиэтиленовые пакеты и герметично закрывали до момента начала анализа с целью исключения вторичного попадания пыли. Всего за исследуемый холодный период (с 8 ноября 2019 г. по 10 марта 2020 г.) на трех ключевых точках было отобрано 118 проб снега. Важно отметить, что отбор проб проводили

в период с полным отсутствием вегетации после формирования устойчивого снежного покрова, который выступал лимитирующим фактором и ограничивал вторичный подъем пыльцевых зерен с подстилающей поверхности в месте отбора проб. До начала пробоподготовки образцы хранили при отрицательных температурах. В лаборатории пробы таяли в тех же полиэтиленовых пакетах при комнатной температуре, а затем их переливали в заранее подготовленные емкости подходящего объема и добавляли 40%-й формалин для сокращения развития микрофлоры. Далее, согласно гидробиологической методике [Руководство..., 1992], пробы отстаивали в темном прохладном месте в течение 7–10 дней в зависимости от объема и концентрировали методом декантации. Подготовленные образцы просматривали под световым микроскопом при увеличении в 400 раз, а для количественной характеристики идентифицируемых частиц в определенном объеме применяли счетную камеру Нажотта объемом 0.2 мл. При идентификации видовой принадлежности использовали атласы [Куприянова, Алешина, 1972, 1978; Дзюба, 2005; Карпович и др., 2015] и международные базы данных [<https://www.paldata.org/search/A>; <https://pollenatlas.net/homepage>].

Траекторный, синоптический и картографический анализы

Для определения районов, с территорий которых с воздушными массами могли поступать в результате вторичного подъема пылевые зерна, был использован траекторный анализ, параметры которого были скорректированы относительно ранее апробированных вариантов [Malygina et al., 2018]. Для этого на каждую дату выпадения атмосферных осадков с помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php] рассчитывали обратные траектории движения воздушных масс.

Траектории строили с использованием архива GDAS (Global Data Assimilation System) [https://www.ncei.noaa.gov/products], имеющего высокое пространственное разрешение (сетка $0.25 \times 0.25^\circ$). Высоты, для которых рассчитывали обратные траектории движения воздушных масс, были выбраны с учетом того, что, попадая в атмосферу, биологические частицы, включая пыльцу, чаще всего первое время находятся в приземном слое, мощность которого зависит от характера подстилающей поверхности, времени суток, температуры окружающей среды, скорости ветра и ряда других параметров. Этот слой атмосферы характеризуется наличием турбулентных потоков, способствующих перемещению частиц не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлении, при этом вертикальная транспортировка частиц из нижних слоев в верхние осуществляется под действием конвективных потоков, а горизонтальная – под действием адвективных [Семенченко, 2002].

Приземный слой является самой нижней частью пограничного слоя атмосферы (ПСА), но на его верхней границе он перекрывается инверсионным слоем, препятствующим дальнейшему вертикальному перемешиванию воздушных масс и, как следствие, ограничивающим попадание частиц в более высокие слои [Brunet et al., 2017]. При этом на верхней границе ПСА направление ветра практически всегда соответствует направлению изобар, а высоты ПСА могут достигать 1500–2000 м [Семенченко, 2002]. В этой связи при расчетах обратных траекторий движения воздушных масс, обуславливающих атмосферные осадки, в качестве “базовых” высот были выбраны высоты ПСА по данным реанализа ERA5 [https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5].

Продолжительность расчета обратных траекторий движения воздушных масс составляла не менее 120 ч, т. е. периода, превышающего часто используемые временные интервалы при аэробилогических исследованиях [Hernandez-Ceballos et al., 2014]. В течение этого периода воздушные массы могли формироваться над открытыми от снега

территориями. Полученные обратные траектории затем были верифицированы в первую очередь с помощью анализа ежедневных приземных карт (АТ-1000), а при необходимости с привлечением карт барической топографии (АТ-500) [http://www.aari.ru/]. Также всегда использовались данные изменений высот геопотенциала, направлений и скоростей ветра из базы NCEP/NCAR [https://www.esrl.noaa.gov/psd/data] для 1000, 925, 850 мбар. На каждую дату отбора проб атмосферных осадков параллельно были проанализированы карты распространения снежного и ледового покровов [https://www.natice.noaa.gov/pub/ims/ims_v3/ims_gif/ARCHIVE/EuAsia/2019/], являющихся лимитирующим фактором для вторичного подъема пылевых зерен с подстилающей поверхности и тем самым ограничивающих количество потенциальных районов, с которых могла поступать пыльца. Вместе с тем для всех идентифицированных таксонов были проанализированы районы их распространения для территорий, соответствующих маршрутам обратных траекторий движения воздушных масс [http://www.euforgen.org/].

Таким образом, в работе на основе ранее полученных результатов [Malygina et al., 2018] был реализован подход, позволяющий определять районы, с территорий которых могли поступать и выпадать со снегом пылевые зерна. Так, на ключевых точках в холодный период параллельно отбирали событийные пробы снега и проводили их дальнейшее микроскопирование с целью идентификации пылевых зерен. Далее, для дат выпадения осадков и для предшествующих периодов (3–5 дней) были проанализированы синоптические условия и определены высоты ПСА, которые в дальнейшем использовались для расчета обратных траекторий движения воздушных масс, обуславливающих выпадение атмосферных осадков. Параллельно были проанализированы ареалы идентифицированных таксонов и карты распространения снежного покрова для уточнения районов, с которых могли поступать выделенные пылевые зерна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пылевые спектры в атмосферных осадках

Проведенный микроскопический анализ показал, что в 45 из 118 (в 38 %) событийных проб снега, отобранных на трех ключевых точках, были определены пылевые зерна деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp.) и трав (*Artemisia* sp., сем. Asteraceae, Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae), Fabaceae, Poaceae), которые предположительно имели адвективный характер поступления, в результате вторичного подъема с подстилающих поверхностей территорий, открытых от снега, над которыми формировались воздушные массы, обуславливающие выпадение осадков.

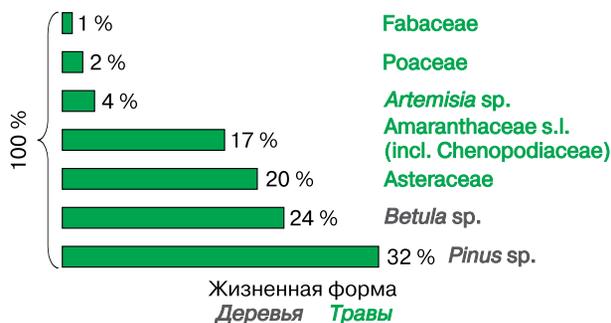


Рис. 2. Таксономическое разнообразие в общем пыльцевом спектре 2019–2020 гг.

Максимальный вклад (56 %) в формирование общего спектра внесла пыльца деревьев при доминировании сосны *Pinus sp.* (32 % от общего спектра), несколько меньше было определено пыльцы березы *Betula sp.* (24 %) (рис. 2). Большое количество пыльцы деревьев объясняется их высокой пыльцевой продуктивностью и анемофильным способом опыления (ветроопыляемые). Так, пыльца березы может переноситься на тысячу километров, а сосны ввиду морфологических особенностей (наличие воздушных мешков) – на несколько тысяч [Карпович и др., 2015].

Пыльца трав представлена более разнообразно по сравнению с пыльцой деревьев, но ее вклад в общий пыльцевой спектр составил всего 44 %, при этом преобладала пыльца семейства астровых Asteraceae (20 %). Существенный вклад в общий спектр внесли пыльцевые зерна представителей семейства маревых Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) (17 %), а остальные травы были представлены в значительно меньших долях: полынь *Artemisia sp.* – 4 %, злаки Poaceae – 2 %, бобовые Fabaceae – 1 %. Пыльца трав, в отличие от деревьев, переносится преимущественно в пределах ареала, но под воздействием адвективных потоков способна подниматься на значительные высоты и переноситься на большие расстояния [Головки, 2004].

Концентрации пыльцевых зерен, идентифицированных в пробах снега каждой ключевой точки, значительно различались (табл. 1). Так, концентрация пыльцы представителей сем. Asteraceae варьировала от 12 шт./л (КТ № 1) до 960 шт./л (КТ № 3). Среди пыльцы деревьев максимальная концентрация приходилась на *Betula sp.* – до 640 шт./л, выделенных в единичных пробах КТ № 1 и 3.

Необходимо отметить, что таксономическое разнообразие пыльцевых зерен, выделенных в пробах снега трех точек исследования, согласуется с данными, полученными для ледникового керна, отобранного на Алтае (массив г. Белуха) [Papina et al., 2013]. Невысокое таксономическое разнообразие

Таблица 1. Концентрация пыльцы (шт./л) в пробах снега

Таксон	Ключевая точка		
	1	2	3
<i>Деревья</i>			
<i>Betula sp.</i>	40–640 156	36–250 145	41–640 158
<i>Pinus sp.</i>	39–120 41	20–500 127	41–390 169
<i>Травы</i>			
<i>Artemisia sp.</i>	0–13 6	0–252 84	0–150 37
Asteraceae	12–109 54	92–500 103	35–960 205
Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae)	22–24 23	53–518 225	26–118 57
Poaceae	–	0–129 64	–
Fabaceae	0–112 24	–	–

Примечание. В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее значение.

разные пыльцевые спектры в объектах криосферы (ледники, снежники, снежный покров и т. д.) связано с особенностями их формирования, которое в значительной степени определяется циркуляционными свойствами [Bourgeois, 2000], а разнообразие спектров зачастую может значительно отличаться от состава растительности изучаемой территории.

Максимальное количество проб (более 40 %) было отобрано на КТ № 3, расположенной на границе гляциологических областей, и для этих проб было характерно максимальное количество идентифицированных пыльцевых зерен (рис. 3).

Из семи выделенных таксонов в пробах данной точки было определено только пять, а доминирующим была пыльца сосны *Pinus sp.* (34 %) (табл. 2), большая часть которой выделена в пробах начала холодного периода (см. рис. 3). Вклад пыльцы представителей сем. Asteraceae и *Betula sp.* составил 26 и 21 % соответственно, максимум которых зафиксирован также в пробах начала периода. Пыльца представителей сем. Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) составила 16 % от общего спектра и была идентифицирована в пробах начала и середины холодного периода. Пыльцевые зерна *Artemisia sp.* определены только в осадках 6 декабря 2019 г., их доля в общем спектре ключевой точки не превышала 3 % (см. табл. 2).

На КТ № 1 в течение холодного периода 2019–2020 гг. была отобрана всего 31 проба снега (27 % от общего числа проб), в 13 из которых была

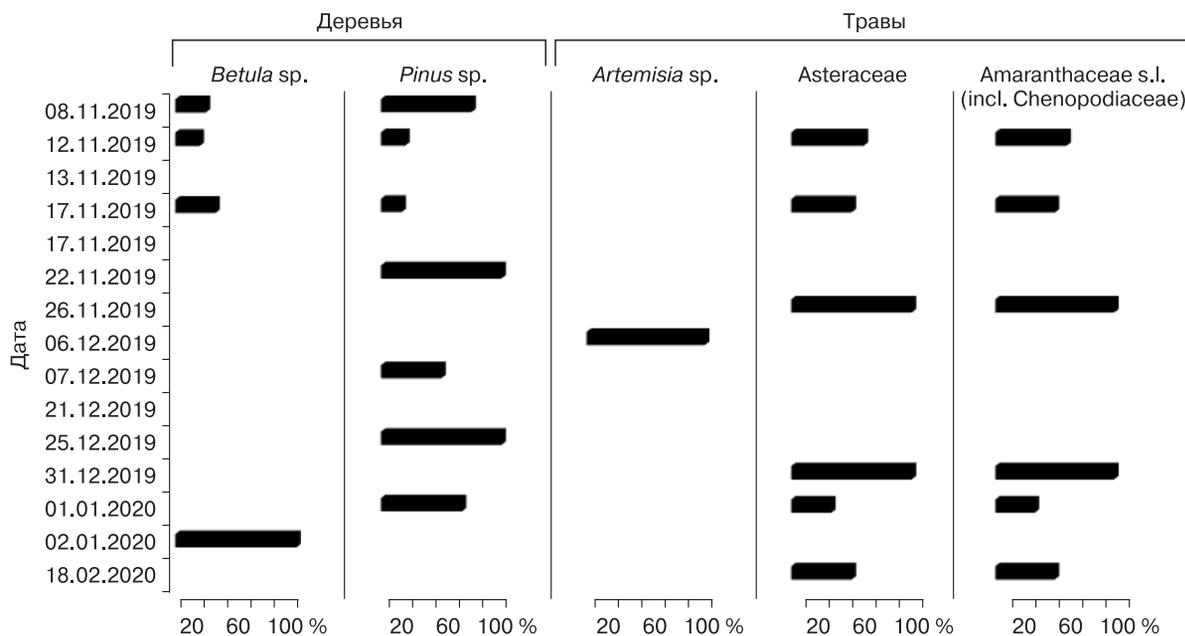


Рис. 3. Пыльцевая диаграмма ключевой точки № 3.

выделена пыльца (рис. 4). Пыльцевой спектр в пробах этой точки был весьма разнообразен и представлен уже шестью таксонами. В спектре существенно преобладала пыльца березы *Betula* sp. (41 %, см. табл. 2), а большинство ее пыльцевых зерен было идентифицировано в пробах, отобранных в начале холодного периода (см. рис. 4), в отличие от данных проб КТ № 2 и 3. Среди трав, как и в спектре КТ № 3, доминировала пыльца представителей сем. Asteraceae.

В 39 пробах снега, отобранных на КТ № 2, было определено 34 % от общего числа пыльцевых

зерен, подсчитанных во всех пробах. Отличительной чертой пыльцевого спектра этой точки являлось преобладание пыльцы трав (51 %), представленной *Artemisia* sp., семейств Asteraceae, Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae), Poaceae (см. табл. 2).

Наибольшая доля пыльцы трав приходилась на представителей сем. Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) – 26 %, которые были выделены в пробах начала холодного периода 2019–2020 гг. (рис. 5). Доля маревых здесь была в 3 раза выше по сравнению с пыльцевым спектром КТ № 1 и в 1.5 раза больше, чем в спектре КТ № 3. В спектре КТ № 2 пыльца *Artemisia* sp. составила 5 % (см. табл. 2), при этом полынь была найдена только в пробах декабря 2019 г., как и в пробах двух других ключевых точек. Пыльца злаков (сем. Poaceae) была идентифицирована только в спектре КТ № 2 и составила 5 % (см. табл. 2). Среди деревьев преобладала пыльца сосны *Pinus* sp. (39 %), найденная в пробах, отобранных в первой половине холодного периода. Доля березы *Betula* sp. в спектре КТ № 2 была наименьшей по сравнению с данными двух других точек исследования и равна 10 % (см. табл. 2).

Районы, с территорий которых с воздушными массами поступали и выпадали со снегом пыльцевые зерна

Для определения этих районов, на примере 23.12.2019 г., когда в пробе, отобранной на КТ № 2, были обнаружены пыльцевые зерна полыни *Artemisia* sp., был реализован следующий подход.

Таблица 2. Вклад (%) отдельных таксонов в общий пыльцевой спектр пробы снега, отобранных в 2019–2020 гг.

Таксон	Ключевая точка		
	1	2	3
<i>Деревья</i>			
<i>Betula</i> sp.	41	10	21
<i>Pinus</i> sp.	26	39	34
Сумма пыльцы деревьев	67	49	55
<i>Травы</i>			
<i>Artemisia</i> sp.	3	5	3
Asteraceae	19	15	26
Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae)	8	26	16
Poaceae	0	5	0
Fabaceae	3	0	0
Сумма пыльцы трав	33	51	45
ИТОГО	100	100	100

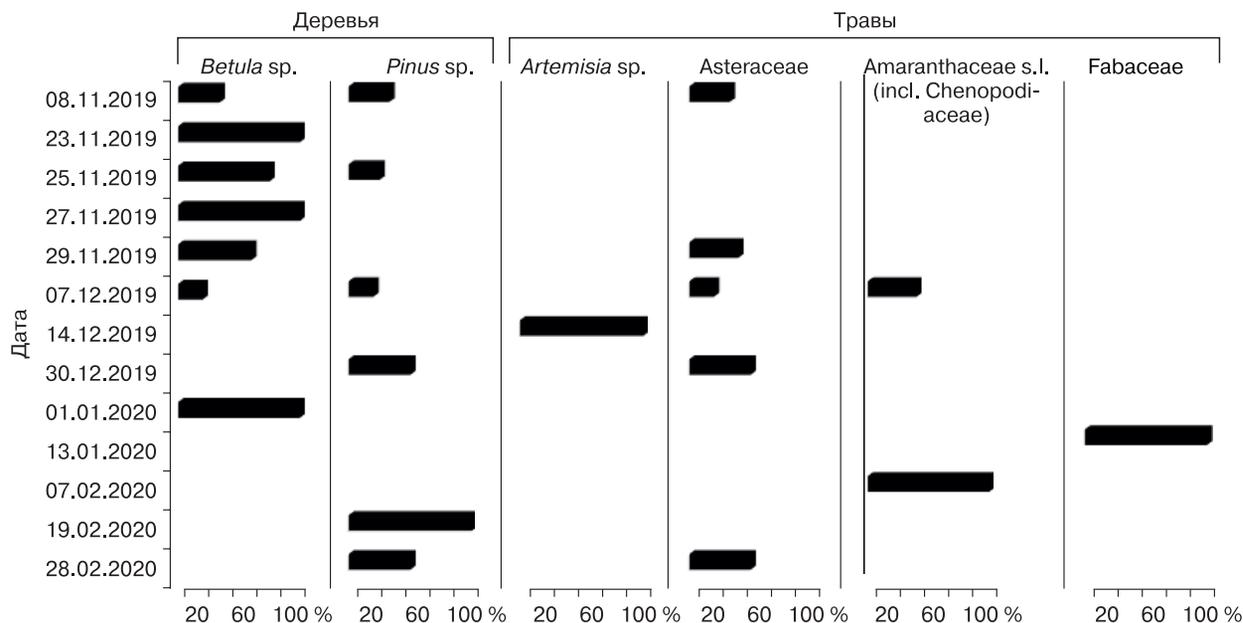


Рис. 4. Пыльцевая диаграмма ключевой точки № 1.

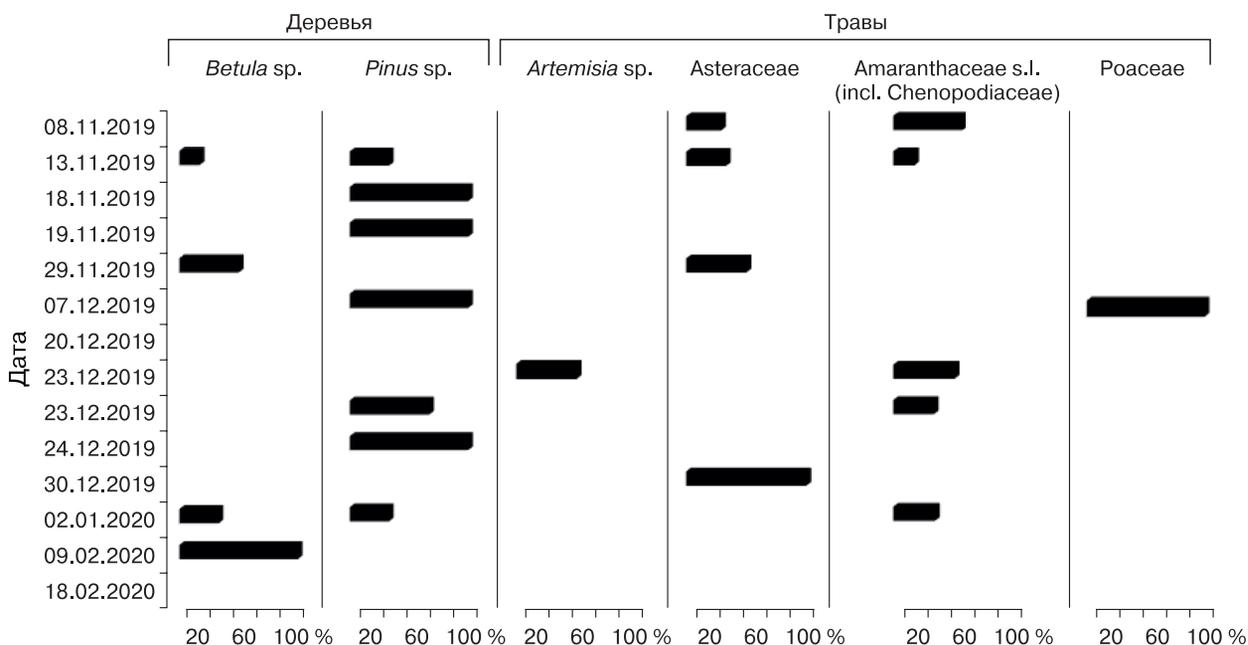


Рис. 5. Пыльцевая диаграмма ключевой точки № 2.

– Рассчитаны обратные траектории движения воздушных масс (модель HYSPLIT) для высоты ПСА с продолжительностью 120 ч (рис. 6, а), что соответствует продолжительности естественного синоптического периода для района исследования.

– Высоты ПСА, полученные из ERA 5, использованы в качестве базовых, так как в их пределах происходит перенос пыльцы на значитель-

ные расстояния. Расчет по высоте ПСА является важным новшеством в реализации данного подхода, в отличие от стандартных высот (500, 1500 и 3000 м), применявшихся ранее [Malygina et al., 2018].

– Выполнен анализ синоптических ситуаций по данным карт барической топографии АТ-1000, средних скоростей и направлений ветра по дан-

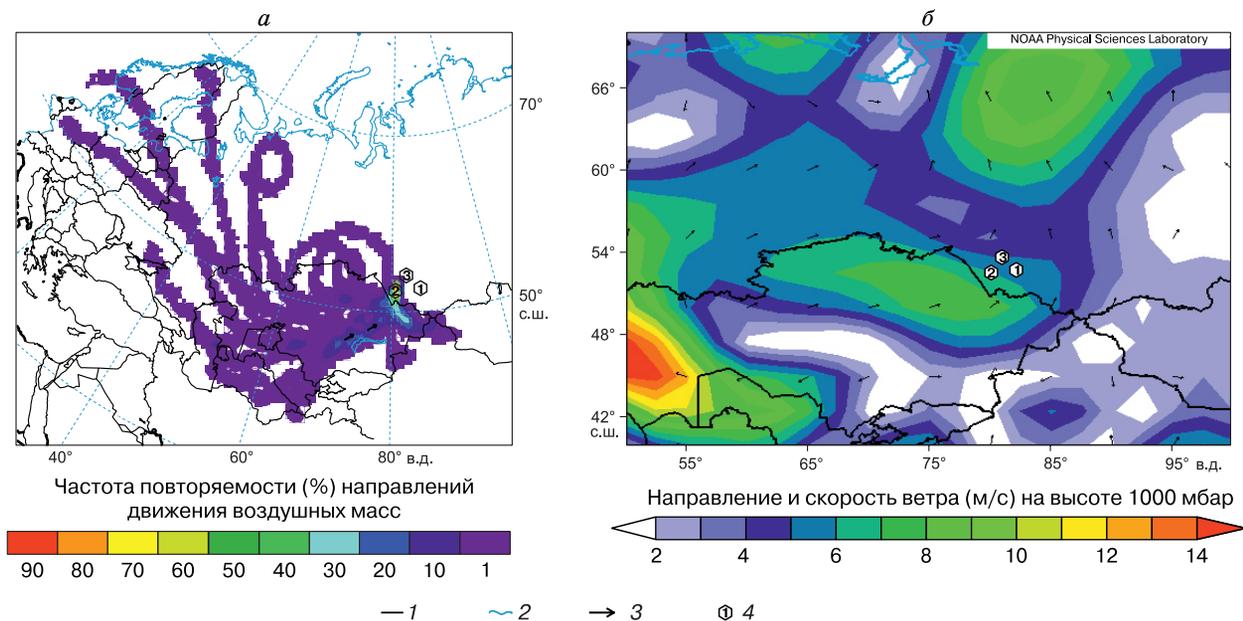


Рис. 6. Обратные траектории движения воздушных масс (а) [<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>] и карта средней скорости и направления ветра (б) [<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data>] на 23.12.2019 г.

1 – государственная граница; 2 – береговая линия; 3 – направление ветра; 4 – ключевая точка.

ным NCEP/NCAR и ERA 5 [<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data>] для высот 1000, 925, 850 мбар на даты выпадения атмосферных осадков и заблаговременно (3–5 дней) с целью верификации рассчитанных траекторий.

– Выделены потенциальные районы, откуда могли поступать идентифицированные пылцевые зерна.

– Проанализированы разноплановые источники по распространению идентифицированных таксонов на территории формирования воздуш-

ных масс и по пути их следования, для подтверждения и уточнения выделенных районов.

– С целью исключения районов, которые были покрыты снегом, ограничивающим вторичный подъем пылцевых зерен с подстилающей поверхности, выполнен анализ карт распространения снежного покрова на период формирования и по пути движения воздушных масс, обуславливающих выпадение атмосферных осадков [https://www.natice.noaa.gov/pub/ims/ims_v3/ims_gif/ARCHIVE/EuAsia/].

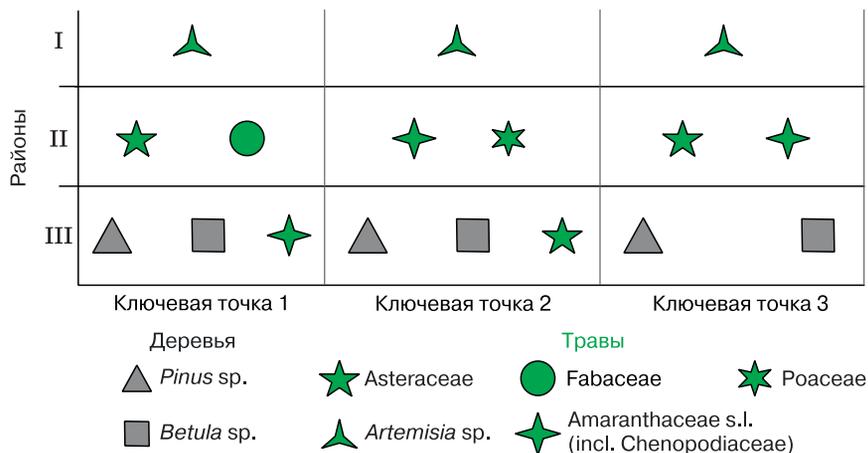


Рис. 7. Районы поступления пылцевых зерен на ключевые точки:

I – Казахский мелкостепной; II – равнины Казахстана; III – горы Алтая и Среднеобская низменность.

Комплексный анализ разноплановых данных в рамках реализованного подхода позволил определить, что воздушные массы, обуславливающие выпадение осадков 23.12.2019 г. на КТ № 2, формировались над территориями Казахского мелкосопочника (см. рис. 6, а), которые в эту дату и одновременно (3–5 дней) были свободны от снега, т. е. могли выступать потенциальным районом поступления пылицы полыни. Направление рассчитанных обратных траекторий движения воздушных масс согласуется с направлением ветра (юго-западное) по данным карт средних скоростей и направлений ветра (NCEP/NCAR) (см. рис. 6, б). Анализ карт барической топографии показывает, что на момент формирования воздушных масс над территорией Казахского мелкосопочника преобладали восходящие потоки (наблюдалась адвекция), вовлекающие пыльцевые зерна в воздушные массы с подстилающих поверхностей, еще не покрытых снегом. Отсутствие снежного покрова на момент формирования воздушных масс подтверждается данными карт распространения снежного покрова, согласно которым территории ключевых точек и сопредельные районы в радиусе 300 км были покрыты снегом. Районы, над которыми происходило формирование воздушных масс, обусловивших выпадение атмосферных осадков, в этот период еще были свободны от снега. Участие полыни в формировании растительного покрова Казахского мелкосопочника велико [Поляков, 1961], что подтверждает тот факт, что эти районы могли выступать источником пыльцевых зерен. Применение описанного выше подхода позволило достоверно определить районы, из которых с осадками 23.12.2019 г. поступали пыльцевые зерна полыни.

Так, для КТ № 1 было определено, что пыльцевые зерна полыни *Artemisia* sp. были занесены с воздушными массами, сформировавшимися над территориями Казахского мелкосопочника (рис. 7). Пыльцевые зерна семейств Asteraceae и Fabaceae, согласно анализу обратных траекторий движений воздушных масс, с высокой степенью вероятности (до 70 %) поступали с равнин Казахстана, которые в период их формирования были свободны от снега. Пыльцевые зерна *Betula* sp., *Pinus* sp. были принесены с еще или уже свободных от снега склонов гор Алтая и Среднеобской низменности (см. рис. 7).

Полынь (*Artemisia* sp.), выделенная в пробах, отобранных на КТ № 2, также поступала с территорий Казахского мелкосопочника (см. рис. 7). Пыльцевые зерна злаков (Poaceae), которые идентифицированы только в пробах, отобранных на КТ № 2, поступали с равнин Казахстана (см. рис. 7), откуда также заносилась пыльца Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae). Пыльца деревь-

ев (*Betula* sp., *Pinus* sp.), выделенная в пробах осадков, как и пыльца представителей сем. Asteraceae, поступала со склонов гор Алтая, а в начале холодного периода 2019–2020 гг. могла поступать и с открытой на тот период территории Среднеобской низменности.

Максимальный вклад в формирование пыльцевого спектра КТ № 3, расположенной на границе гляциологических областей, внесли зерна, занесенные с территорий, расположенных на свободных от снега склонах гор Алтая, которые выступали источниками пылицы *Betula* sp. и *Pinus* sp. Пыльца *Artemisia* sp. была занесена с территорий Казахского мелкосопочника, которые были свободны от снежного покрова в период формирования воздушных масс, обуславливающих осадки, что прослеживалось и для двух других ключевых точек. Пыльцевые зерна семейств Asteraceae и Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) поступали с воздушными массами, сформированными над равнинами Казахстана (см. рис. 7).

Таким образом, в течение холодного сезона 2019–2020 гг. для трех ключевых точек исследования, расположенных в соседних нивально-гляциальных иерархических единицах и в зоне их контакта, выделены основные районы, с территорий которых поступали и осаждались пыльцевые зерна: равнины Казахстана, горные территории Алтая и Среднеобская низменность. Общим районом поступления пылицы полыни *Artemisia* sp. с воздушными массами, обусловившими выпадение снега, отобранного в декабре 2019 г. на трех точках исследования, стала территория Казахского мелкосопочника.

Пыльца деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp.), выделенная в снеге, заносилась с воздушными массами, преимущественно сформированными над открытыми от снега склонами гор Алтая и Среднеобской низменности. Пыльца трав сем. Asteraceae поступала со снегом на КТ № 1 с равнин Казахстана, на КТ № 2 – с гор Алтая, на КТ № 3 – со Среднеобской равнины. С равнин Казахстана заносились пыльцевые зерна семейств Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) и Poaceae, идентифицированные в пробах осадков, отобранных на КТ № 2. С этих территорий также поступала пыльца семейств Asteraceae и Fabaceae и выпадала с атмосферными осадками на КТ № 1.

ВЫВОДЫ

1. Микроскопический анализ 118 событийных проб снега, отобранных в течение холодного периода 2019–2020 гг. в Алтае-Саянской, Тоболо-Иртышской гляциологических областях и зоне их контакта, показал наличие в 38 % проб пыльцевых зерен деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp.) и трав (*Artemisia* sp., семейств Asteraceae, Amaranthaceae

s.l. (incl. Chenopodiaceae), Fabaceae, Poaceae). Наибольший вклад (57 %) в формирование общего пыльцевого спектра внесли деревья, в частности пыльца *Pinus* sp. (32 %) и *Betula* sp. (24 %), а среди трав – сем. Asteraceae (21 %) и сем. Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) (17 %), при этом суммарный вклад *Artemisia* sp., семейств Poaceae и Fabaceae не превысил 7 %.

2. В пыльцевом спектре снега, отобранного в Алтае-Саянской гляциологической области, существенно преобладала пыльца деревьев (67 %), в осадках зоны контакта двух гляциологических областей ее вклад был меньше (до 55 %), а в спектре Тоболо-Иртышской гляциологической области доминировали травы (51 %). Такие различия могут быть связаны с тем, что выбранные полигоны были расположены не только в соседних гляциологических областях, но и в разных гляциологических провинциях.

3. Успешно реализован подход по определению территорий, с которых со снегом поступали пыльцевые зерна в соседние равноуровневые иерархические единицы гляциологического районирования (провинции и области), включающий событийный отбор проб твердых атмосферных осадков и их микроскопический анализ; построение обратных траекторий движения воздушных масс (HYSPLIT) с учетом высоты ПСА; анализ карт снежного и ледового покрова, а также ареалов распространения идентифицированных таксонов.

4. Основным районом поступления пыльцевых зерен *Artemisia* sp. в декабре 2019 г. со снегом, выпавшим как в соседних гляциологических областях и провинциях, так и в зоне их контакта, стал Казахский мелкосопочник. Это дает основание в дальнейшем использовать пыльцевые зерна данного таксона в качестве индикаторов не только атмосферного переноса, сопровождающегося выпадением осадков в Алтае-Саянской и Тоболо-Иртышской гляциологических областях, но и переноса с ними других частиц природного и антропогенного происхождения в холодный период.

5. Территории, с которых с воздушными массами поступали и осаждались со снегом пыльцевые зерна сем. Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae), на трех ключевых точках различались. Так, на КТ № 3, расположенную в зоне контакта гляциальных областей, пыльца маревых поступала как с равнин Казахстана (Северо-Казахской, Туранской) и со Среднеобской низменности, так и с гор Алтая. В этой связи при использовании пыльцы сем. Amaranthaceae s.l. (incl. Chenopodiaceae) в качестве маркера атмосферных процессов холодного периода в Алтае-Саянской и Тоболо-Иртышской гляциологических областях необходимо учитывать полученные результаты для

каждой территории, расположенной в других низменно-гляциальных иерархических единицах.

6. Пыльцевые зерна сем. Fabaceae были определены только в снеге Алтае-Саянской гляциологической области, в то время как пыльца сем. Poaceae только в осадках Тоболо-Иртышской гляциологической области, но в зоне контакта этих гляциологических областей пыльцы данных таксонов не обнаружено. Это дает основание говорить о возможности использования пыльцы каждого идентифицированного таксона для оценки путей поступления атмосферных осадков лишь в той гляциологической области, в осадках которой он был идентифицирован.

Благодарности. Отбор проб и микроскопирование выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-35-90078). Траекторный анализ проводился при поддержке РФФИ (проект № 19-05-50055), синоптический анализ в рамках госбюджетного проекта № FUFZ-2021-0007.

Литература

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Под ред. В.М. Котлякова. М., Изд. РАН, 1997, 392 с.
- Винокуров Ю.И.** Ландшафтная индикация в эколого-географических исследованиях / Ю.И. Винокуров, Ю.М. Цимбалей. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2016, 258 с.
- Гляциологический словарь** / В.М. Котляков, В.Р. Алексеев, Н.В. Волков и др. Л., Гидрометеиздат, 1984, 564 с.
- Головко В.В.** Экологические аспекты аэропалинологии: аналитический обзор. Новосибирск, ГПНТБ, 2004, 107 с.
- Дзюба О.Ф.** Атлас пыльцевых зерен (неацетоллизированных и ацетоллизированных), наиболее часто встречающихся в воздушном бассейне Восточной Европы. М., ИГиРГИ, 2005, 70 с.
- Ивлев Л.С.** Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб., НИИХ СПбГУ, 1999, 194 с.
- Карпович И.В.** Атлас пыльцевых зерен / И.В. Карпович, Е.С. Дребезгина, Е.Н. Еловикина и др. Екатеринбург, Урал. рабочий, 2015, 318 с.
- Котляков В.М.** Избранные сочинения в шести книгах. Кн. 2. Снежный покров и ледники Земли. М., Наука, 2004, 448 с.
- Куприянова Л.А.** Пыльца и споры растений флоры СССР / Л.А. Куприянова, Л.А. Алешина. Л., Наука, 1972, т. 1, 171 с.
- Куприянова Л.А.** Пыльца и споры двудольных растений флоры европейской части СССР / Л.А. Куприянова, Л.А. Алешина. Л., Наука, 1978, т. 1, 174 с.
- Ландшафтная карта Алтайского края.** Барнаул, ИВЭП СО РАН, 2016, 2 л.
- Поляков П.П.** Род Польшь – *Artemisia* L. // Флора СССР. Т. 26. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1961, с. 425–631.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем** / Под ред. В.А. Абакумова и др. СПб., Гидрометеиздат, 1992, 318 с.
- Семенченко Б.А.** Физическая метеорология. М., Аспект Пресс, 2002, 417 с.
- Харламова Н.Ф.** Климат Алтайского региона. Барнаул, Изд-во Алт. ун-та, 2013, 108 с.

- Bourgeois J.C.** Seasonal and interannual pollen variability in snow layers of arctic ice caps // *Rev. Palaeobot Palynol.*, 2000, vol. 108, No. 1–2, p. 17–36.
- Brugger S., Gobet E., Sigl M. et al.** Ice records provide new insights into climatic vulnerability of Central Asian forest and steppe communities // *Global and Planetary Change*, 2018, vol. 169, p. 188–201.
- Brunet Y., Wery N., Gales A.** Short-scale transport of bioaerosols // *Microbiology of Aerosols*. Paris, Wiley-Blackwell, 2017, p. 137–154.
- Festi D., Carturan L., Kofler W. et al.** Linking pollen deposition and snow accumulation on the Alto dell'Ortles glacier (South Tyrol, Italy) for sub-seasonal dating of a firn temperate core // *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, p. 937–948.
- Fröhlich-Nowoisky J., Kampf C.J., Weber B. et al.** Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions // *Atmospheric Res.*, 2016, vol. 182, p. 346–376.
- Hernandez-Ceballos M.A., Skjoth C.A., Garcia-Mozo H. et al.** Improvement in the accuracy of back trajectories using WRF to identify pollen sources in southern Iberian Peninsula // *Intern. J. Biometeorol.*, 2014, vol. 58 (10), p. 2031–2204.
- IPCC, 2019:** IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte et al. (Eds.). – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf
- Kasprzyk I., Borycka K.** Alder pollen concentrations in the air during snowfall // *Intern. J. Biometeorol.*, 2019, vol. 63, p. 1–8.
- Malygina N.S., Zinchenko G.S., Ryabchinskaya N.A., Mitrofanova E.Yu.** Sources of biological aerosols in winter precipitation in the south of Western Siberian // *Rus. Meteorol. and Hydrol.*, 2018, vol. 43, No. 4, p. 264–270.
- Papina T., Blyakharchuk T., Eichler A. et al.** Biological proxies recorded in a Belukha ice core, Russian Altai // *Climate of the Past*, 2013, vol. 9, No. 5, p. 2399–2411.
URL: <http://www.aari.ru/> (дата обращения: 12.10.2020).
URL: <http://www.euforgen.org/> (дата обращения: 12.10.2020).
URL: <https://pollenatlas.net/homepage> (дата обращения: 12.10.2020).
URL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data> (дата обращения: 12.10.2020).
URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products> (дата обращения: 04.03.2021).
URL: https://www.natice.noaa.gov/pub/ims/ims_v3/ims_gif/ARCHIVE/EuAsia/2019/ (дата обращения: 12.10.2020).
URL: <https://www.paldat.org/search/A> (дата обращения: 12.10.2020).
URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 12.10.2020).
URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (дата обращения: 12.10.2020).
- Glaciologicheskij slovar' [Glaciological dictionary].** V.M. Kotlyakov, V.R. Alekseev, N.V. Volkov et al. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 564 p. (in Russian).
- Golovko V.V.** *Ekologicheskie aspekty aeropalinologii: analiticheskij obzor [Ecological aspects of aeropalinology: an analytical review].* Novosibirsk, GPNTB, 2004, 107 p. (in Russian).
- Dzjuba O.F.** Atlas pyl'cevych zeren (neacetolizirovannyh i acetolizirovannyh), naibolee chasto vstrechajushhhsja v vozdušnom bassejne Vostochnoj Evropy [Atlas of pollen grains (non-acetolized and acetolized), most common in the air basin of Eastern Europe]. Moscow, IGIRGI, 2005, 70 p. (in Russian).
- Ivlev L.S.** *Fizika atmosfernih ajerozol'nyh system [Physics of atmospheric aerosol systems].* Sankt-Petersburg, NIIH SPbGU, 1999, 194 p. (in Russian).
- Karpovich I.V., Drebezgina E.S., Elovikova E.N. et al.** Atlas pyl'cevych zeren [Pollen atlas]. Ekaterinburg, Ural'skij rabochij, 2015, 318 p. (in Russian).
- Kotlyakov V.M.** *Izbrannye sochinenija v šesti knigah. Kniga 2. Snezhnyj pokrov i ledniki Zemli [Selected works in six books. Book 2. Snow cover and glaciers of the Earth].* Moscow, Nauka, 2004, 448 p. (in Russian).
- Kupriyanova L.A., Aleshina L.A.** Pyl'tsa i spory rastenij flory SSSR [Pollen and plant spores of the flora of the USSR]. Leningrad, Nauka, 1972, vol. 1, 171 p. (in Russian).
- Kupriyanova L.A., Aleshina L.A.** Pyl'ca i spory dvudol'nyh rastenij flory evropejskoj chasti SSSR [Pollen and spores of dicotyledonous plants of the flora of the European part of the USSR]. Leningrad, Nauka, 1978, vol. 1, 174 p. (in Russian).
- Landshaftnaja karta Altajskogo kraja [Landscape map of the Altai Territory].** Barnaul, IWEP SO RAN, 2016, 2 l. (in Russian).
- Polykov P.P.** The genus sagebrush – *Artemisia* L. In: *Flora USSR*. Vol. 26. Moscow, Nauka, 1961, p. 425–631 (in Russian).
- Rukovodstvo po gidrobiologičeskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem [Guidelines for Hydrobiological Monitoring of Freshwater Ecosystems].** V.A. Abakumov et al. Sankt-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992, 318 p. (in Russian).
- Semenchenko B.A.** *Fizicheskaja meteorologija [Physical meteorology].* Moscow, Aspekt Press, 2002, 417 p. (in Russian).
- Harlamova N.F.** *Klimat Altajskogo regiona [Climate of the Altai region].* Barnaul, Izd-vo Alt. un-ta, 2013, 108 p. (in Russian).
- Bourgeois J.C.** Seasonal and interannual pollen variability in snow layers of arctic ice caps. *Rev. Palaeobot Palynol.*, 2000, vol. 108, No. 1–2, p. 17–36, doi.org/10.1016/S0034-6667(99)00031-7.
- Brugger S., Gobet E., Sigl M. et al.** Ice records provide new insights into climatic vulnerability of Central Asian forest and steppe communities. *Global and Planetary Change*, 2018, vol. 169, p. 188–201, doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.010.
- Brunet Y., Wery N., Gales A.** Short-scale transport of bioaerosols. In: *Microbiology of Aerosols*. Paris, Wiley-Blackwell, 2017, p. 137–154.
- Festi D., Carturan L., Kofler W. et al.** Linking pollen deposition and snow accumulation on the Alto dell'Ortles glacier (South Tyrol, Italy) for sub-seasonal dating of a firn temperate core. *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, p. 937–948, doi.org/10.5194/tc-11-937-2017.
- Fröhlich-Nowoisky J., Kampf C.J., Weber B. et al.** Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, 2016, vol. 182, p. 346–376, doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018.
- Hernandez-Ceballos M.A., Skjoth C.A., Garcia-Mozo H. et al.** Improvement in the accuracy of backtrajectories using WRF to

References

Atlas snezhno-ledovykh resursov mira [The world atlas of snow and ice resources]. V.M. Kotlyakov (Ed.). Moscow, RAN, 1997, 392 p. (in Russian).

Vinokurov Yu.I., Cimbalej Yu.M. Landshaftnaja indikacija v jekologo-geograficheskijh issledovanijah [Landscape indication in ecological and geographical research]. Novosibirsk, Akademicheskoe izd-vo "Geo", 2016, 258 p. (in Russian).

- identify pollen sources in southern Iberian Peninsula. Intern. J. Biometeorology, 2014, vol. 58 (10), p. 2031–2204, doi.org/10.1007/s00484-014-0804-x.
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Y.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (Eds.). – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf
- Kasprzyk I., Borycka K. Alder pollen concentrations in the air during snowfall. Intern. J. Biometeorology, 2019, vol. 63, p. 1–8, doi.org/10.1007/s00484-019-01781-3.
- Malygina N.S., Zinchenko G.S., Ryabchinskaya N.A., Mitrofanova E.Yu. Sources of biological aerosols in winter precipitation in the south of Western Siberian. Russian Meteorology and Hydrology, 2018, vol. 43, No. 4, p. 264–270, doi.org/10.3103/S1068373918040088.
- Papina T., Blyakharchuk T., Eichler A. et al. Biological proxies recorded in a Belukha ice core, Russian Altai. Climate of the Past, 2013, vol. 9, No. 5, p. 2399–2411, doi:10.5194/cpd-9-2589-2013.
- URL: <http://www.aari.ru/> (last visited: 12.10.2020).
- URL: <http://www.euforgen.org/> (last visited: 12.10.2020).
- URL: <https://pollenatlas.net/homepage> (last visited: 12.10.2020).
- URL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data> (last visited: 12.10.2020).
- URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products> (last visited: 04.03.2021).
- URL: https://www.natice.noaa.gov/pub/ims/ims_v3/ims_gif/ARCHIVE/EuAsia/2019/ (last visited: 12.10.2020).
- URL: <https://www.palдат.org/search/A> (last visited: 12.10.2020).
- URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (last visited: 12.10.2020).
- URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (last visited: 12.10.2020).

*Поступила в редакцию 20 января 2021 г.,
после доработки – 7 февраля 2022 г.,
принята к публикации 14 ноября 2022 г.*