

КЛИМАТ И КРИОСФЕРА

УДК 551.345; 557.79
DOI: 10.15372/KZ20240605
EDN: VJIBIS

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

В.Н. Макаров¹, А.Ф. Жирков^{1,*}, В.П. Осипов², С.А. Маркова¹

¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

² Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., 4, Россия

*Автор для контакта; e-mail: zhirkov_af@mail.ru

Приведены результаты исследования, проведенного на геокриологическом стационаре “Туймаада” в Центральной Якутии. Проанализирована связь испарения с поверхности почв с жидкими осадками за теплый период 2015–2016 и 2019 гг. и изучен их химический состав. Средняя величина испарения, которая превысила количество осадков примерно на 40 %, составила 1.37 (0.33–3.13) мм/сут. Интенсивность испарения особенно велика в мае, что связано с оттаиванием мерзлых пород и просачиванием снеговой воды в сезонноталый слой. Химический состав атмосферных осадков в течение лета остается стабильным гидрокарбонатно-кальциевым, но минерализация понижается к осени на 20–40 %. Содержание большинства химических элементов меняется со временем, максимум приходится на май–июнь. Наибольшая контрастность для хлоридов, сульфатов, натрия и аммония характерна в периоды максимального и минимального испарения с поверхности почв.

Ключевые слова: атмосферные осадки, испарение, химический состав осадков, многолетнемерзлые породы, криолитозона.

Ссылка для цитирования: Макаров В.Н., Жирков А.Ф., Осипов В.П., Маркова С.А. Количественная оценка испарения и химический состав атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 6, с. 58–66. DOI: 10.15372/KZ20240605. EDN: VJIBIS.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF EVAPORATION AND CHEMICAL COMPOSITION
OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN CENTRAL YAKUTIA

V.N. Makarov¹, A.F. Zhirkov^{1,*}, V.P. Osipov², S.A. Markova¹

¹ Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia

² Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Miusskaya Sq. 4, Moscow, 125047 Russia

*Corresponding author; e-mail: zhirkov_af@mail.ru

The results of a study of the relationship between evaporation from the soil surface and atmospheric precipitation during the warm seasons of 2015–2016 and 2019 at the Tyimaada geocryological research station in Central Yakutia are analyzed. The volumes of evaporation from the soil surface and precipitation amount and chemical composition were studied. The average evaporation was 1.37 (0.33–3.13) mm/day, exceeding precipitation by about 40%. The intensity of evaporation was especially high in the first month of the warm season (May), which was associated with the thawing of frozen soil and the seepage of meltwater from snow into the seasonally thawed layer. The bicarbonate calcium chemical composition of atmospheric precipitation during the summer remained stable, but the degree of mineralization decreased by 20–40% by autumn. The content of most chemical elements in precipitation was higher in May–June and decreased in the second half of the warm season. The greatest contrasts in the concentrations of chlorides, sulfates, sodium, and ammonium in the atmospheric precipitation were observed during the periods of maximum and minimum evaporation from the soil surface.

Keywords: atmospheric precipitation, evaporation, chemical composition of precipitation, frozen ground, permafrost zone.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс испарения является одним из основных звеньев в круговороте воды на земном шаре и важнейшим фактором теплообмена на поверхно-

сти почвы. Теория испарения воды с поверхности почв имеет большое научное и практическое значение для сельского хозяйства, оценки безопасно-

сти геотехнических сооружений в периоды засухи и др. [Павлов, 1975; Шумова, 2018; Teng et al., 2014]. Для исследования процесса испарения были разработаны различные экспериментальные подходы, система тестирования столба почвы, лизиметр, экологическая камера [Рейфер и др., 1976; Miralles et al., 2016], получена оценка суммарного испарения методами численного моделирования [Надежина и др., 2020], изучены временные и пространственные вариации содержания воды в почве [Dolman, 2010]. Однако выполняется мало прямых измерений испарения из почв, особенно в Восточной Сибири.

С почв, расположенных на разных элементах рельефа и в различных климатических условиях, испаряется неодинаковое количество воды. Величина испарения напрямую зависит от количества осадков: чем больше количество летних осадков, тем интенсивнее испарение. В засушливые годы испарение уменьшается вследствие снижения влагозапасов в деятельном слое. Процесс испарения в условиях Центральной Якутии протекает очень интенсивно, суммарная величина его варьирует от 100 до 120–150 мм за вегетационный период и от 150 до 190 мм за весь теплый период года [Гаврилова, 1973; Гаврильев, 1991; Угаров, Мандаров, 2000]. Несмотря на это, влияние атмосферных осадков на величину испарения в мерзлотных районах пока изучено слабо. Практически неисследованным остается также влияние воды, испаряющейся с поверхности почв, на химический состав атмосферных осадков.

На формирование химического состава атмосферных осадков в основном воздействуют природно-климатические (извержение вулканов, скорость, сила и направление ветра, интенсивность испарения и др.) и техногенные факторы (выхлопные газы автомобилей, продукты сгорания топлива при эксплуатации промышленных объектов). Поступающие в атмосферу вещества переносятся воздушными потоками на расстояния от нескольких сотен до нескольких тысяч километров [Коробка и др., 2014; Семенец, 2018; Свистов и др., 2023]. Перемещение загрязняющих веществ на территорию Центральной Якутии осуществляется за счет преобладающего западного переноса воздушных масс [Гаврилова, 1973].

В связи с этим целью настоящей работы являются оценка и анализ динамики испарения воды с поверхности почв и его роли в формировании хи-

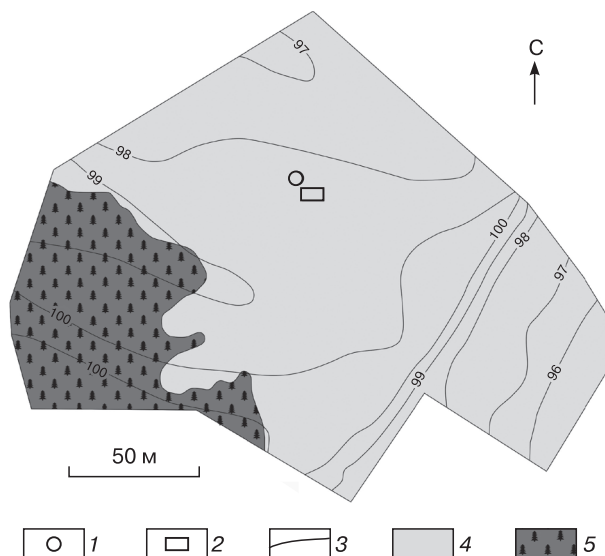


Рис. 1. Комплексный геоэкологический стационар "Туймаада".

1 – испаритель; 2 – установка для сбора осадков; 3 – изогипсы, м; 4 – луг; 5 – сосновый лес.

мического состава атмосферных осадков Центральной Якутии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение количества выпадающих атмосферных осадков и величины испарения с поверхности почв проведено на комплексном геоэкологическом стационаре Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН "Туймаада" (КГСТ), с мая по сентябрь 2015–2016 и 2019 гг. (рис. 1).

Территория исследования

Стационар "Туймаада" расположен в Центральной Якутии на II надпойменной террасе р. Лены в пригородной юго-западной части г. Якутска и представляет собой почти горизонтальную поверхность с высотой около 110 м. Среднегодовая температура почв на глубине 1 и 2 м на КГСТ составляет -2.4 и 2.0 °C соответственно (табл. 1).

Годовое количество осадков в среднем за период с 1961 по 2020 г. варьирует от 140 до 250 мм, коэффициент увлажнения равен 0.8–1.0. Осадки в

Таблица 1. Температура грунтов (°C) на комплексном геоэкологическом стационаре "Туймаада" за период 1995–2019 гг.

Глубина, м	Среднегодовая температура			Абсолютный максимум	Абсолютный минимум	Амплитуда
	наибольшая	средняя	наименьшая			
1	-1.3	-2.4	-4.0	8.8	-14.5	23.3
2	-1.3	-2.0	-3.2	0.2	-8.1	8.3

летний период выпадают неравномерно, в период наблюдений их количество составило от 11 до 67 мм в месяц. Продолжительность холодного периода (со среднесуточной температурой ниже 0 °С) около 220 дней, теплого периода – около 145 дней. Средняя зимняя температура воздуха (октябрь–апрель) составляет –25.9 °С, средняя летняя (май – сентябрь) равна 12.3 °С [Варламов и др., 2021].

Величина испарения с поверхности почвы в 1.5–2 раза превышает количество осадков (350–450 мм), поэтому летом происходит сильное иссушение почвы. Индекс сухости для летнего сезона равен 3.0, особенно недостаточное увлажнение отмечается весной и в начале лета [Там же].

Для Центральной Якутии характерны слабые ветры, зимой преобладает штиль. Среднемесячная скорость ветра зимой до 2 м/с, летом – до 3.0–3.5 м/с; среднегодовая скорость ветра от 1.8 до 2.4 м/с. Летом преобладают ветры западного, северо-западного и юго-западного направления, зимой – юго-западного и западного. Снежный покров образуется в октябре и держится более 7 месяцев (в среднем 205–215 дней). Наибольшей высоты он достигает в конце февраля – 30–40 см, в отдельные годы – 45–60 см. Полный сход снежного покрова наблюдается в первых числах мая [Климат..., 1982; Варламов и др., 2021].



Рис. 2. Испаритель почвенный ГГИ-500-50М (ГР-25).

Центральная Якутия характеризуется значительными ресурсами солнечной энергии. Это связано с соответствующими циркуляционными условиями, определяющими повторяемость антициклональной погоды (с малой облачностью и высокой прозрачностью атмосферы). С влажностью воздуха и ее дефицитом тесно связаны процессы испарения. Средняя годовая испаряемость колеблется от 400 до 450 мм [Климат..., 1982]. Высокая испаряемость обусловлена летним прогревом и значительной величиной коэффициента увлажнения.

Инструментальная оценка испарения

Для измерения величины испарения с поверхности почвы, покрытой растительностью, использовался весовой почвенный испаритель типа ГГИ-500-50М (рис. 2), соответствующий ТУ МЕР.416314.001.

Почвенный испаритель (лизиметр) состоит из двух цилиндров, диаметр внутреннего цилиндра-испарителя 25.2 см, высота 50 см, внутренний цилиндр плотно входит в наружный. Во внутренний цилиндр закладывали почвенный монолит. Внешний цилиндр устанавливали на место вынудой почвы, на дне его помещали специальный водосборный сосуд для учета просачивающейся во время дождя воды и затем вкладывали внутренний цилиндр с почвой. Лизиметр вбивали в почву вровень с его поверхностью и вытаскивали с почвенным монолитом. Оценка суммарного испарения производилась путем измерения и расчета всех основных компонентов водного баланса: количества выпавших атмосферных осадков, дренажа поверхностных вод, изменения запаса воды в почвенном монолите.

Наблюдения за изменением веса почвенного монолита проводились раз в два дня. Через каждые 30 дней почвенный монолит меняли, чтобы избежать пересыхания при испарении [Жирков, 2019]. Вес испарителя определяли с помощью складских весов типа CAS до 60 кг, с погрешностью 50 г.

Величина испарения (W) определялась по изменению веса почвенного монолита, помещенного в испаритель, при одновременном учете выпавших осадков и количества воды, просочившихся через монолит, по формуле [Рейфер и др., 1976]:

$$W = \frac{10}{S} (P_1 - P_2) + r_1 - r_2,$$

где S – площадь поперечного сечения цилиндра-испарителя (500 см²); P_1 – вес испарителя в предыдущее время, г; P_2 – вес испарителя в настоящее время, г; r_1 – количество осадков, мм; r_2 – количество воды, просочившейся в водосборник, мм.

Химический состав осадков

Для изучения объема и химического состава атмосферных осадков на территории КГСТ была смонтирована установка по сбору осадков (рис. 3).

В месте установки аппаратуры отсутствуют деревья и кустарники, источники загрязнения атмосферы, ландшафт исключает высокое запыление воздуха. Аппаратура установлена в центре выбранного участка на высоте 1.2 м над поверхностью земли. Мониторинг физических характеристик и химического состава атмосферных осадков ведется непрерывно с 1996 г. Отбор проб осуществляется один раз в месяц [Макаров, 2007].

Химический анализ осадков выполняется в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН. В образцах осадков определяется содержание макрокомпонентов: SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; микроэлементов – Cs, Li, Sr, Ba, F, P; измеряются величина pH, Eh и электропроводность (γ).

Количество выпадений из атмосферы (P , мг/м² за 30 дней), поступивших с осадками на земную поверхность, рассчитывалось по формуле

$$P = \frac{100CV}{\pi r^2},$$

где C – концентрация в растворе образца, мг/мл; V – исследуемый объем, мл; r – радиус горлышка сосуда с образцом, мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наблюдений показали, что процесс испарения на территории КГСТ протекает интенсивно, испаряемость превышает количество выпадающих летних атмосферных осадков, соответственно, 208 и 150 мм (рис. 4). Это согласуется с проведенными ранее исследованиями [Гаврилова, 1973; Павлов, 1975; Скрыбин и др., 1998], показавшими, что в Центральной Якутии испарение превышает количество выпадающих летних ат-



Рис. 3. Установка для сбора осадков.

мосферных осадков примерно на 40 %. На существенную роль испарительного фракционирования при формировании атмосферной влаги указывают и результаты изучения стабильных изотопов ^{18}O и D в осадках Центральной Якутии [Галанин и др., 2019].

Интенсивность испарения особенно велика в первый месяц (май) теплого периода, затем, в августе и сентябре, объем осадков начинает преобладать над испарением на 20–25 %. Одновременно понижается минерализация дождевых вод с 22–26 мг/л в мае–июне до 15–19 мг/л в июле–сентябре. В начале теплого периода года (в мае) ис-

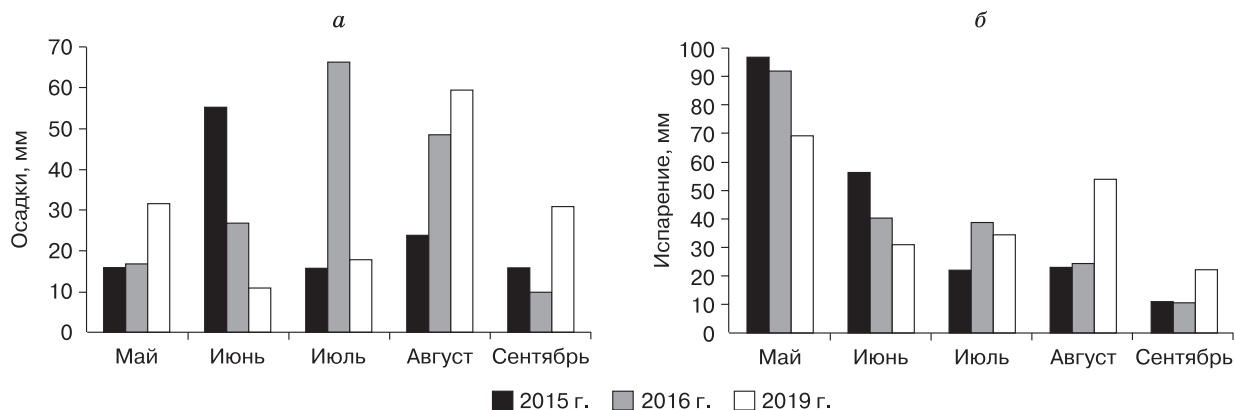


Рис. 4. Количество осадков (а) и величина испарения (б) за теплый период (май–сентябрь) 2015, 2016, 2019 гг.

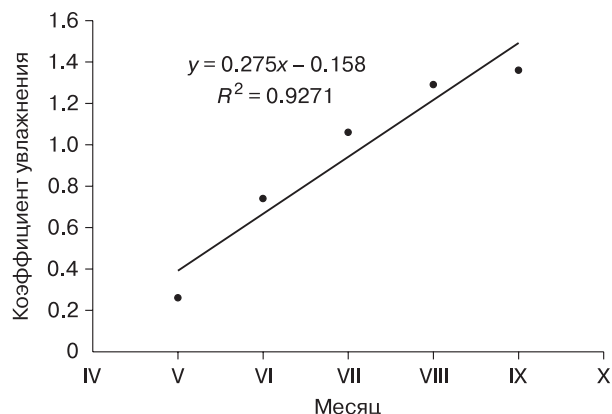


Рис. 5. Изменение коэффициента увлажнения в теплый период 2015, 2016, 2019 гг.

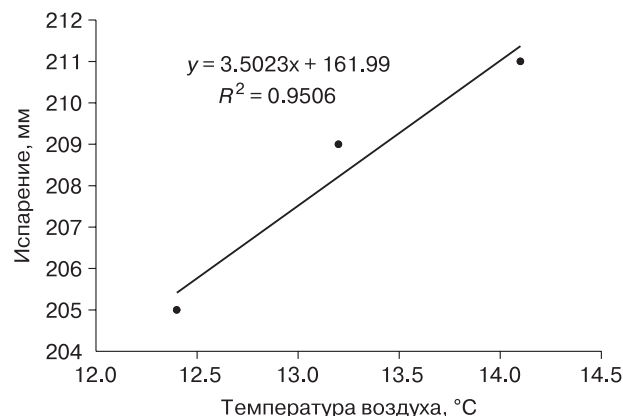


Рис. 6. Зависимость величины испарения за теплый период года от средней за этот период температуры воздуха на комплексном геокриологическом стационаре "Туймаада".

парение превышает количество осадков почти в 4 раза (на 64 мм – среднее за период наблюдений) и составляет 40 % от общего объема испарения.

Такая неравномерность испарения связана с большим количеством воды, которая образуется при оттаивании мерзлых пород и просачивании снеговой воды в весенний период. Величина коэффициента увлажнения закономерно повышается от начала к концу теплого периода: от 0.26 в мае до 1.36 в сентябре (рис. 5).

Высокая испаряемость вызвана насыщенностью почв водой (практически до полной влагоемкости) за счет криогенного водоупора, летнего прогрева и соотношения количества осадков и испаряемости. Средняя величина коэффициента увлажнения в период наблюдений составляет 0.72 (табл. 2).

Известно, что чем выше температура воздуха, тем больше он может содержать водяного пара. Подобная зависимость количества испаряющейся воды от температуры воздуха наблюдается и на КГСТ. При повышении средней за теплый период температуры воздуха на 2.3 °C в 2019 г. по сравне-

нию с 2016 г. содержание пара возрастает на 3 % (рис. 6).

Результаты мониторинга химического состава атмосферных осадков на территории КГСТ в теплый период 2015, 2016 и 2019 гг. приведены в табл. 3.

В начале теплого времени 2016 г. (май, июнь) наблюдается аномальное для этого периода повышение минерализации осадков (электропроводность в 2–4 раза выше, чем в 2015 и 2019 гг.). Рост минерализации осадков связан с высокой концентрацией сульфатов, натрия и аммония. Одновременно величина pH осадков переходит из кислой области в слабощелочную (см. табл. 3). Возможной причиной данной аномалии может быть региональный перенос серы и азота с юго-запада из Иркутской области. Ранее было установлено, что атмосферные загрязнения такого рода в зимний период могут достигать района г. Ленска [Макаров, 2007].

Превышение величины испарения над осадками особенно четко заметно в мае: +81 мм в 2015 г., +75 мм в 2016 г. и +37 мм в 2019 г. При этом наблюдается и повышенная минерализация атмосферных осадков как следствие интенсивного поступления растворенных веществ в атмосферу в весенний период.

В мае–июне, когда в балансе испарение–осадки преобладает испарение (см. табл. 2), минерализация дождевых вод увеличивается до 23–35 мг/л при минимальном объеме осадков (рис. 7). В период июль–сентябрь, когда роль испарения минимальна, с увеличением количества осадков снижается их минерализация (см. рис. 7).

В начале теплого периода года, особенно в мае, когда высокое испарение связано с большим количеством воды, поступающим при таянии снежного покрова и мерзлых пород, минерализа-

Таблица 2. Средние значения величины испарения и количества осадков на стационаре "Туймаада" в 2015, 2016, 2019 гг.

Месяц	Осадки		Испарение, мм	Коэффициент увлажнения	Разница испарение–осадки, мм
	минерализация, мг/л	количество, мм			
V	26	22	86	0.26	64
VI	22	31	42	0.74	11
VII	18	34	32	1.06	–2
VIII	15	44	34	1.29	–10
IX	17	19	14	1.36	–5
Среднее	19	30	42	0.72	12
Сумма	–	150	208	–	58

Таблица 3. Химический состав атмосферных осадков на стационаре “Туймаада” в 2015, 2016, 2019 гг.

Месяц	pH	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HPO ₄	γ, мСм/см
		мг/л										
2015 г.												
V	5.93	21.1	3.00	0.04	1.90	0.40	3.44	0.37	0.42	0.35	0.005	70
VI	5.91	18.8	0.69	0.08	0.90	0.06	2.20	0.26	0.46	0.30	0.123	50
VII	6.29	25.0	1.32	0.02	1.20	0.36	2.00	0.23	0.40	0.30	0.005	80
VIII	6.48	17.8	0.86	0.16	1.00	0.36	1.29	0.19	0.24	0.50	0.120	25
IX	6.13	23.5	1.20	0.36	0.66	0.27	1.30	0.26	0.42	0.14	0.005	30
2016 г.												
V	7.10	16.2	12.8	0.02	1.07	3.50	4.0	0.90	2.40	1.40	0.109	150
VI	7.64	18.3	9.90	0.13	1.00	2.00	2.5	1.00	1.40	1.40	0.216	180
VII	6.71	16.4	1.22	0.04	0.35	0.16	1.1	0.17	0.24	2.80	1.140	40
VIII	6.55	14.5	0.89	0.49	1.10	0.30	1.4	0.24	0.29	0.90	0.005	30
IX	6.13	16.9	2.50	0.27	1.77	1.00	2.6	0.40	0.80	0.30	0.444	40
2019 г.												
V	6.30	18.0	2.00	0.30	0.98	1.00	5.2	0.90	0.90	0.80	0.200	36
VI	6.20	16.4	2.50	0.34	1.90	2.90	4.5	0.47	1.30	0.40	0.289	30
VII	6.20	20.8	1.60	0.09	1.40	1.90	3.6	0.42	1.30	0.70	0.442	34
VIII	6.10	13.6	0.98	0.81	0.71	0.75	2.5	0.33	0.85	1.00	0.005	15
IX	5.85	13.0	1.00	0.04	0.35	1.30	2.5	0.38	0.98	0.15	0.016	14

Примечание. pH – показатель кислотности; HCO₃⁻ – гидрокарбонаты; NO₂⁻ – нитриты; NO₃⁻ – нитраты; Cl⁻ – хлориды; Ca²⁺ – кальций; Mg²⁺ – магний; Na⁺ – натрий; NH₄⁺ – аммоний; HPO₄ – фосфаты; SO₄²⁻ – сульфаты; γ – электропроводность, мСм/см.

ция осадков практически не зависит от их количества, что согласуется с результатами, полученными ранее [Макаров, 2007].

В середине и конце теплого периода, когда наблюдается преобладание осадков над испарением (в июле–августе 2016 г. на 25–28 % и в августе–сентябре 2019 г. на 6–9 %), концентрация большинства ионов в химическом составе осадков минимальна (табл. 4). Исключением является аномальное для всего периода наблюдений содержание в осадках в июне–июле 2016 г. аммония (2.8 мг/л) и фосфатов (1.14 мг/л) вследствие лесных пожаров в Якутии. Летние месяцы – май, июнь, июль – наиболее пожароопасные, когда осадков мало, а трава, леса – сухие [Матвеева, 2021]. Высокое содержание в осадках аммония и фосфатов в это время, возможно, является следствием применения фосфорной кислоты и сульфата аммония как химических агентов при тушении пожаров.

С мая по сентябрь химический состав атмосферных осадков остается стабильным гидрокарбонатно-кальциевым, близким к почвенным водам: нитратно-гидрокарбонатным натриево-кальциевым. Атмосферные осадки слабоминерализованные (13–34 мг/л), преимущественно слабокислые (pH = 6.1),

Весной в результате повышения температуры воздуха и схода снежного покрова развивается

конвекция воздушных масс, когда незакрепленные растительным покровом частицы почвы поднимаются в воздух, а выпадающие осадки поглощают и растворяют их. Содержание частиц пыли в дождевых водах КГСТ в мае–июне почти в 4 раза выше, чем в июле–сентябре.

В августе–сентябре минерализация осадков снижается до 15–17 мг/л. Понижение минерализации дождевых вод к концу теплого периода обусловлено уменьшением концентрации сульфатов и хлоридов кальция.

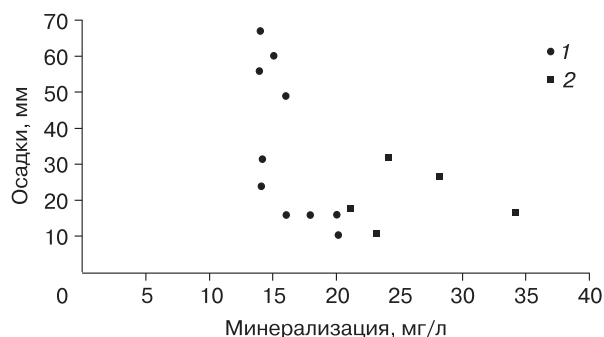


Рис. 7. Соотношение количества и минерализации летних осадков на комплексном геоэкологическом стационаре “Туймаада”.

1 – область преобладания осадков; 2 – область преобладания испарения.

Таблица 4. Количество осадков, величина испарения и объем выпадений из атмосферы химических элементов в теплый период 2015, 2016, 2019 гг.

Год, месяц	Сумма испарения (И), мм	Скорость испарения, мм/сут	Количество осадков (О), мм	$t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	γ , мСм/см	И/О	C	S	N	P	$\text{H}^+ \cdot 10^{-2}$	Cl	Объем выпадений, мг/м ²
							г/(м ² ·месяц)						
2015													
V	97	3.13	16	7.3	70	6.06	0.066	0.016	0.011	0.0003	2.18	6.368	494
VI	56	1.87	56	15.5	50	1.00	0.199	0.013	0.025	0.0259	6.65	3.244	1284
VII	22	0.73	16	20.4	80	1.38	0.080	0.007	0.009	0.0003	0.83	5.846	501
VIII	23	0.77	24	17.1	25	0.96	0.080	0.007	0.016	0.0110	0.78	8.507	521
IX	11	0.37	16	5.6	30	0.69	0.075	0.007	0.006	0.0003	1.21	4.404	458
2016													
V	92	2.97	17	7.6	150	5.41	0.011	0.054	0.074	–	0.13	59.08	927
VI	40	1.33	27	16.0	180	1.48	0.0053	0.097	0.092	–	0.06	54.14	1360
VII	39	1.30	67	18.1	40	0.58	0.105	0.208	0.027	–	1.26	10.38	1458
VIII	24	0.77	49	13.4	30	0.49	0.115	0.139	0.015	–	1.38	14.71	1158
IX	10	0.33	10	6.9	40	1.00	0.006	0.032	0.008	–	0.72	9.58	270
2019													
V	69	2.26	32	9.0	36	2.16	0.116	0.022	0.031	0.002	1.65	32.93	991
VI	31	1.03	11	19.2	30	2.82	0.034	0.009	0.009	0.001	0.66	30.48	323
VII	35	1.17	18	19.3	34	1.94	0.075	0.010	0.016	0.003	1.16	35.09	588
VIII	54	1.74	60	15.8	15	0.90	0.159	0.029	0.070	0.001	4.73	44.66	1282
IX	22	0.73	31	7.0	14	0.71	0.083	0.011	0.007	0.001	4.48	41.08	622

Примечание. $t_{\text{ср}}$ – средняя температура воздуха, $^\circ\text{C}$; γ – электропроводность, мСм/см; И/О – отношение суммы испарения к количеству осадков. Плотность атмосферных выпадений (содержания элементов, г/(м²·месяц)): С – углерода, S – серы, N – азота, P – фосфора, Cl – хлора, $\text{H}^+ \cdot 10^{-2}$ – водорода.

Содержание большинства химических элементов в осадках выше в начальный период и понижается во второй половине теплого времени. Такая же тенденция была установлена ранее Н.П. Анисимовой [1980], изучавшей атмосферные и конденсационные воды в Центральной Якутии.

Максимальная неравномерность поступления с осадками в различные периоды теплого времени года (весна/осень) характерна для хлоридов, сульфатов, натрия и аммония, коэффициент контрастности (КК) которых колеблется от 3.1 до 4.7. Отмечено относительно более равномерное в течение теплого времени года поступление на поверхность с осадками гидрокарбонатов, КК = 1.1 [Анисимова, 1980]. По изменению контрастности выпадений в начальный и конечный периоды теплого времени года (май–сентябрь) компоненты группируются в следующий ряд (по уменьшению КК):

Cl (4.7) > SO_4 (3.7) > Na (3.4) > NH_4 (3.1) > Mg (2.3) > Ca (2.5) > NO_3 (2.2) > HCO_3 (1.1) > pH (1.1).

Высокое содержание хлоридов, сульфатов, аммония и других ионов в осадках начала лета (май, июнь) обусловлено интенсивным испарением водорастворимых солей, насыщающих почву, в атмосферу.

Количественно испарение характеризуется скоростью испарения – слой воды, которая испаряется с единицы поверхности (м²) за единицу времени (сутки). Его средняя величина на КГСТ за трехлетний период составила 1.37 мм/сут (помесячный интервал 0.33–3.13), что выше границы диапазона оценок испарения почвы, равного 0.17–0.89 мм/сут, полученного на основе оперативных моделей земной поверхности и альтернативного продукта дистанционного зондирования [Abolafia-Rosenzweig et al., 2020]. Это отклонение от средних оценок обусловлено геоэкологическими условиями, определяющими высокую влажность почв деятельного слоя. Скорость испарения особенно велика в мае (2.79 мм/сут) и составляет от 33 до 47 % скорости для теплого периода года, что связано с большим количеством воды, которая образуется при таянии мерзлых пород и просачивании снеговой воды в весенний период. Поступление осадков начинает преобладать над испарением только во второй половине теплого периода (в августе и сентябре).

ВЫВОДЫ

Наблюдениями установлено, что величина испарения (208 мм) превышает количество летних атмосферных осадков (150 мм) в среднем на 58 мм (39 %).

Геокриологические условия определяют высокую влажность почв деятельного слоя, поэтому на первый безморозный месяц (май) приходится от 33 до 46 % суммарного испарения теплого времени года. Скорость испарения в мае колеблется в пределах 2.26–3.13 мм/сут. Поступление осадков начинает преобладать над испарением в августе–сентябре и скорость испарения снижается до 0.41 мм/сут.

Средняя скорость испарения в теплое время года за трехлетний период составила 1.37 мм/сут. Наблюдается функциональная зависимость величины испарения воды от температуры воздуха.

Средний коэффициент увлажнения в период наблюдений составляет 0.72. Коэффициент увлажнения закономерно повышается от начала к концу теплого периода: май – 0.26, сентябрь – 1.36. Такая неравномерность испарения также связана с большим количеством воды, которая образуется при просачивании снеговой воды и таянии мерзлых пород в весенний период.

Для дождевых вод характерна отрицательная корреляция величины минерализации и объема выпадающих осадков. В начале теплого периода года, особенно в мае, минерализация осадков практически не зависит от количества осадков.

Превышение испарения над осадками сопровождается и повышением содержания растворимых веществ. В целом характерно равномерное уменьшение минерализации осадков при возрастании объема выпадения дождевых вод. Однако в мае–июне, когда в балансе испарение–осадки преобладает испарение, минерализация дождевых вод увеличивается до 23–35 мг/л. Повышение минерализации осадков в это время обусловлено поступлением в атмосферу относительно минерализованных паров испаряющейся воды при естественной конвекции воздуха.

Химический состав атмосферных осадков в период наблюдений был гидрокарбонатно-кальциевым, близким к почвенным водам, степень минерализации – слабая (13–34 мг/л). При постоянстве химического состава минерализация осадков понижается к осени на 20–40 %, до 13–20 мг/л в сентябре.

Содержание большинства химических элементов в осадках выше в мае–июне и понижается во второй половине теплого времени. Максимальная контрастность поступления с осадками в различные периоды теплого времени года (весна/осень) характерна для хлоридов, сульфатов, натрия и аммония.

Благодарности. *Натурные исследования выполнены в рамках государственных заданий НИОКТР № 122011800062-5 “Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика”;* НИОКТР

№ 122012400106-7 “Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования”. Анализ результатов выполнен при финансировании РНФ (грант № 23-61-10032 “Разработка самообучающейся системы оценки рисков эксплуатации и диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе гибридного интеллекта и высокопроизводительных вычислительных систем”).

Литература

- Анисимова Н.П.** Химический состав инфильтрата атмосферных и конденсационных вод в сезоннопротаивающих песках Центральной Якутии // Взаимосвязь поверхностных и подземных вод мерзлой зоны. Якутск, Кн. изд-во, 1980, с. 82–90.
- Варламов С.П.** Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии / С.П. Варламов, Ю.Б. Скачков, П.Н. Скрябин. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2021, 156 с.
- Гаврилова М.К.** Климат Центральной Якутии. 2-е изд. Якутск, Кн. изд-во, 1973, 120 с.
- Гаврильев П.П.** Мелиорация мерзлотных земель в Якутии. Новосибирск, Наука, 1991, 184 с.
- Галанин А.А., Павлова М.Р., Папина Т.С. и др.** Стабильные изотопы ^{18}O и D в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) // Лед и снег, 2019, т. 59, № 3, с. 333–354.
- Жирков А.Ф.** Влияние инфильтрации летних атмосферных осадков и внутригрунтовой конденсации на формирование температурного режима грунтов в условиях Центральной Якутии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2019, 47 с.
- Климат Якутска.** Л., Гидрометеиздат, 1982, 246 с.
- Коробка О.В., Овчаренко Е.А., Эйрих А.Н. и др.** Химический состав атмосферных осадков города Барнаула // Ползуновский вестн., 2014, т. 2, № 4, с. 80–83.
- Макаров В.Н.** Геохимический мониторинг атмосферных осадков в Центральной Якутии. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2007, 88 с.
- Матвеева А.Г.** Динамика лесных пожаров на Дальнем Востоке России // Сиб. лесн. журн., 2021, № 6, с. 30–38.
- Надежина Е.Д., Школьник И.М., Стернзат А.В. и др.** Моделирование атмосферного пограничного слоя над неоднородно увлажненной поверхностью как инструмент для оценки суммарного испарения // Метеорология и гидрология, 2020, № 12, с. 27–38.
- Павлов А.В.** Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, Кн. изд-во, 1975, 302 с.
- Рейфер А.Б., Алексеенко М.И., Бурцев П.И. и др.** Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л., Гидрометеиздат, 1976, 431 с.
- Свистов П.Ф., Першина Н.А., Павлова М.Т.** Атлас диаграмм химического состава атмосферных осадков (практическое применение). СПб., ЛЕМА, 2023, 140 с.
- Семенец Е.С.** Особенности химического состава и кислотности атмосферных осадков в зависимости от природно-ландшафтных условий и уровня антропогенной нагрузки (на примере Северо-Западного федерального округа) // Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорологического ун-та. СПб., 2018, № 53, с. 145–155.

Скрябин П.Н. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска / П.Н. Скрябин, С.П. Варламов, Ю.Б. Скачков. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1998, 144 с.

Угаров И.С. Орошение дождеванием кормовых культур в Центральной Якутии / И.С. Угаров, А.А. Мандаров. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2000, 128 с.

Шумова Н.А. Оценка и анализ испарения, транспирации и запасов воды в почве полей яровой пшеницы за безморозный период в различные по водности годы // Экосистемы: экология и динамика. Оценка экосистем и их компонентов, 2018, т. 2, № 2, с. 65–88.

Abolafia-Rosenzweig R., Badger A.M., Small E.E., Livneh B. A continental-scale soil evaporation dataset derived from Soil Moisture Active Passive satellite drying rates // Sci. Data, 2020, vol. 7, 406 p. – <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00748-z>

Dolman A.J., de Jeu R.A.M. Evaporation in focus // Nat. Geosci., 2010, vol. 3, p. 296–297.

Miralles D.G., Jiménez C., Jung M. et al. The WACMOS-ET project – Part 2: Evaluation of global terrestrial evaporation data sets // Hydrol. Earth System Sci., 2016, vol. 20, p. 823–842.

Teng J., Yasufuku N., Liu Q., Liu S. Experimental evaluation and parameterization of evaporation from soil surface // Natural Hazards, 2014, vol. 73, No. 3, p. 1405–1418.

References

Anisimova N.P. Chemical composition of atmospheric and condensation water infiltrate in seasonally thawing sands of Central Yakutia. In: Vzaimodvyaz' poverkhnostnykh i podzemnykh vod merzloi zony [Relationship between surface and underground waters of the frozen zone]. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1980, p. 82–90 (in Russian).

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. Monitoring teplovogo rezhima gruntov Tsentral'noy Yakutii [Monitoring the thermal regime of soils in Central Yakutia]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2021, 156 p. (in Russian).

Gavrilova M.K. Klimat Tsentral'noy Yakutii [Climate of Central Yakutia]. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1973, 120 p. (in Russian).

Gavriilyev P.P. Melioratsiya merzlotnykh zemel' v Yakutii [Reclamation of permafrost lands in Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1991, 184 p. (in Russian).

Galanin A.A., Pavlova M.R., Papina T.S. et al. Stable isotopes of ^{18}O and D in key components of water flows and the permafrost zone of Central Yakutia (Eastern Siberia). Led i Sneg [Ice and Snow], 2019, vol. 59 (3), p. 333–354. – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-414>

Zhirkov A.F. Vliyaniye infil'tratsii letnikh atmosferykh osadkov i vnutrigruntovoy kondensatsii na formirovaniye temperaturnogo rezhima gruntov v usloviyakh Tsentral'noy Yakutii [The influence of infiltration of summer precipitation and intra-ground condensation on the formation of the temperature regime of soils in the conditions of Central Yakutia]. Abstract of dissertation candidate tech. sci. Yakutsk, 2019, 47 p. (in Russian).

Klimat Yakutsk [Climate of Yakutsk]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 246 p. (in Russian).

Korobka O.V., Ovcharenko E.A., Eurich A.N., Serykh T.G., Dryupina E.Ty., Papina T.S. Chemical composition of atmo-

spheric precipitation in the city of Barnaul. Polzunovskiy vestnik, 2014, vol. 2, No. 4, p. 80–83.

Makarov V.N. Geokhimicheskiy monitoring atmosferykh osadkov v Tsentral'noy Yakutii [Geochemical monitoring of atmospheric precipitation in Central Yakutia]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2007, 88 p. (in Russian).

Matveeva A.G. Dynamics of forest fires in the Russian Far East. Sibirskiy Lesnoj Zhurnal [Sib. J. F. Sci.], 2021, No. 6, p. 30–38.

Nadezhina E.D., Shkol'nik I.M., Sternzat A.V. et al. The modeling of the atmospheric boundary layer over inhomogeneously moistened surface as a tool for evapotranspiration estimation. Rus. Meteorol. Hydrol., 2020, vol. 45, No. 12, p. 835–843.

Pavlov A.V. Teploobmen pochvy s atmosferoy v severnykh i umerennykh shirotakh territorii SSSR [Heat exchange between soil and atmosphere in the northern and temperate latitudes of the USSR]. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1975, 302 p. (in Russian).

Reifer A.B., Alekseenko M.I., Burtsev P.I. et al. Spravochnik po gidrometeorologicheskim priboram i ustanovkam [Handbook of hydrometeorological instruments and installations]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1976, 431 p. (in Russian).

Svistov P.F., Pershina N.A., Pavlova M.T. Atlas of diagrams of the chemical composition of atmospheric precipitation (practical application). St. Petersburg, LEMA, 2023, 140 p. (in Russian).

Semenets E.S. Features of the chemical composition and acidity of an atmospheric precipitation depending on landscape conditions and anthropogenic loading (on the example of Northwestern Federal District). Uchenye Zapiski RGGU [Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University]. St. Petersburg, 2018, No. 53, p. 145–155.

Skryabin P.N., Varlamov S.P., Skachkov Yu.B. Mezhdogovaya izmenchivost' teplovogo rezhima gruntov rayona Yakutsk [Interannual variability of the thermal regime of soils in the Yakutsk region]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 1998, 144 p. (in Russian).

Ugarov I.S., Mandarov A.A. Orosheniye dozhdevaniyem kormovykh kul'tur v Tsentral'noy Yakutii [Sprinkler irrigation of forage crops in Central Yakutia]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2000, 128 p. (in Russian).

Shumova N.A. Assessment and analysis of evaporation, transpiration and water reserves in the soil of spring wheat fields during the frost-free period in years of different water content. In: Proc. of the Ecosystems: ecology and dynamics. Assessment of ecosystems and their components, 2018, vol. 2, No. 2, p. 65–88.

Abolafia-Rosenzweig R., Badger A.M., Small E.E., Livneh B. A continental-scale soil evaporation dataset derived from Soil Moisture Active Passive satellite drying rates. Sci. Data, 2020, vol. 7, 406 p. – <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00748-z>

Dolman A.J., de Jeu R.A.M. Evaporation in focus. Nat. Geosci., 2010, vol. 3, p. 296–297.

Miralles D.G., Jiménez C., Jung M. et al. The WACMOS-ET project – Part 2: Evaluation of global terrestrial evaporation data sets. Hydrol. Earth System Sci., 2016, vol. 20, p. 823–842.

Teng J., Yasufuku N., Liu Q., Liu S. Experimental evaluation and parameterization of evaporation from soil surface. Natural Hazards, 2014, vol. 73, No. 3, p. 1405–1418.

*Поступила в редакцию 6 февраля 2024 г.,
после доработки – 3 ноября 2024 г.,
принята к публикации 6 ноября 2024 г.*