

УДК 634.026, 615.47(075.8), 581.1.03, 631.531.173, 551.51, 550.371, 551.5, 539.104(078)

ОПЫТ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СОСНЫ

Б. З. Белашев

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

Предмет исследования составляют временные ряды разности электрических потенциалов вдоль ствола сосны и согласованные временные ряды метеорологических и геомагнитных параметров, измеренные аппаратно-программными комплексами геофизической обсерватории «Петрозаводск» и Ботанического сада Петрозаводского государственного университета в 2017–2022 годах, а также временные ряды базы данных Кр-индекса глобальной геомагнитной активности. Продемонстрировано существование характерных режимов разности электрических потенциалов сосны, определяемых факторами среды и физиологическими процессами в дереве. Проанализированы реакции разности электрических потенциалов сосны на атмосферные процессы, грозу, феномены космической погоды: магнитные бури и солнечное затмение. Данные наблюдений интерпретированы с учетом особенностей электрического поля Земли.

Ключевые слова: разность электрических потенциалов; сосна; транспирация; температура; давление; влажность; осадки; гроза; магнитные бури; солнечное затмение

Для цитирования: Белашев Б. З. Опыт автоматической регистрации биоэлектрической активности сосны // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 4. С. 5–14. doi: 10.17076/mat1895

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН, тема FMEN-2023-0008).

B. Z. Belashev. EXPERIENCE OF AUTOMATICALLY RECORDING PINE BIOELECTRICAL ACTIVITY

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

The subject of the study is the time series of the difference in electrical potentials along the trunk of a pine tree and the aligned time series of meteorological and geomagnetic parameters measured by hardware and software complexes of the Petrozavodsk geophysical observatory and the Petrozavodsk State University Botanical Garden in 2017–2022, as well as the time series of the global geomagnetic activity Kp index database. It is demonstrated that there exist characteristic patterns in the electric potential difference in pine trees depending on season, temperature, precipitation, humidity, underpinned by

physical environmental factors and physiological processes in the tree. The response of the electric potential difference of pine trees to atmospheric processes, thunderstorms, and space weather phenomena (magnetic storms and solar eclipse) are studied. The results of these observations are qualitatively interpreted using features of the Earth's electric field.

Keywords: electric potential difference; pine; transpiration; temperature; pressure; humidity; precipitation; thunderstorm; magnetic storms; solar eclipse

For citation: Belashev B. Z. Experience of automatically recording pine bioelectrical activity. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024;4:5–14. doi: 10.17076/mat1895

Funding. The studies were funded from the federal budget through state assignment to the Karelian Research Centre RAS (Institute of Geology KarRC RAS, FMEN-2023-0008).

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от животных, поведением демонстрирующих чувствительность к изменениям окружающей среды, большинство растений внешне не реагируют на раздражители. Их реакции проявляются в электрических сигналах.

Форму сигналов определяют процессы деполяризации и реполяризации клеточных мембран [13]. Одиночный электрический импульс по аналогии с возбуждением нервного волокна называют потенциалом действия, сигнал, реагирующий на сильные раздражители: механическое повреждение, ожог, – переменным потенциалом. Переменный потенциал имеет расширенную фазу реполяризации и содержит повторяющиеся импульсы небольшой амплитуды. Электрическая активность растений может также проявляться в виде микро-ритмов.

На клеточном уровне распространение электрических сигналов исследовано подробно [9]. В дереве электрические сигналы распространяются через мелкие клетки флоэмы, протоксилемы, сосудистые пучки, транспортирующие воду и питательные вещества.

Менее изучены интегративные биоэлектрические показатели растений в естественной среде [15]. Электрическую реакцию растений на изменения окружающей среды пытаются использовать для определения оптимальных условий выращивания, повышения продуктивности растений и изучения реакций на внешние раздражители. По сравнению с трудоемкими методами оценки состояния растений по морфологическим признакам, дающими погрешность 50 процентов, мониторинг электрической активности растений представляется более точным, быстрым и информативным [3]. Реализованный в автоматизированных системах, такой мониторинг упрощает решение за-

дач оперативной диагностики, оповещения и прогнозирования [5]. В условиях глобального изменения климата и усиления антропогенного воздействия на лесные экосистемы такой мониторинг особенно важен.

Цель статьи – описание опыта продолжительной автоматической регистрации разности электрических потенциалов вдоль ствола сосны, изучение влияния на них метеорологических и геофизических факторов окружающей среды. Проанализировано влияние метеорологических параметров, грозы, магнитных бурь и солнечного затмения на разность электрических потенциалов сосны. Исследование выполнено в Геофизической обсерватории «Петрозаводск» на основе согласованных временных рядов данных, полученных в 2017–2022 гг. с помощью специальных аппаратно-программных комплексов [12].

Выбор сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в качестве фитоиндикатора в системах экологического мониторинга определен широким ареалом ее распространения, неспецифической реакцией на уровень загрязнения атмосферного воздуха и почвы, сохранением фотосинтетической активности при низких температурах. Разветвленная, пластичная корневая система дерева охватывает значительную часть толщи почвы и грунта. Сосна энергично поглощает питательные вещества, экономно их расходует, сохраняет способность роста при ограниченном запасе азота в почве. Ее древесина прочна, устойчива к гниению. Высота дерева, достигающая нескольких десятков метров, позволяет регистрировать разницу электрических потенциалов на большом расстоянии между электродами.

МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ, АППАРАТУРА

Геофизическая обсерватория «Петрозаводск» находится в Ботаническом саду Пет-

розаводского государственного университета (ПетрГУ) в лесу на окраине города. Располагающаяся на противоположном берегу Петрозаводской губы Онежского озера территория испытывает слабое антропогенное влияние. Объектом исследования являлась сосна высотой около 25 м, растущая на каменистом грунте. Латунные электроды были вбиты в ствол сосны с южной стороны на глубину 2 см; нижний – в 10 см от земли, верхний – в 10 м от нижнего электрода.

Система регистрации разности электрических потенциалов сосны и геомагнитных параметров аналогична системе, используемой в геофизической обсерватории «Воеково». Для измерения разности электрических потенциалов между электродами задействован один канал геофизического комплекса GI-MTS-1 [10], расположенного в непосредственной близости от объекта исследования. Другие каналы синхронно регистрировали вариации H-, D-, Z-компонент геомагнитного поля, электрических составляющих магнитотеллурических токов. Шаг дискретизации регистрируемых данных составлял 1 с. Данные Кр-индекса геомагнитной активности с трехчасовым интервалом дискретизации взяты с сайта [4].

Метеостанция Davis Vantage Pro2 Plus находилась на расстоянии около 100 м от исследуемой сосны [14]. Метеостанция с интервалом 30 минут автоматически измеряла температуру, влажность, атмосферное давление, осадки, направление, силу ветра и интенсивность солнечной радиации в видимом и УФ-диапазоне.

Результаты измерений в режиме реального времени поступали на компьютер Ботанического сада и через мобильный Интернет передавались на серверы ПетрГУ и Института геологии Карельского научного центра РАН.

Из-за высокой чувствительности комплекса GI-MTS-1 в данных его измерений присутствовали импульсные помехи. В ходе обработки помехи отфильтровывали и заменяли интерполированными значениями, определенными по оставшимся данным. Шаг выборки обработанных, осредненных геофизических данных составлял 10 минут.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В сезонных записях изменения разности электрических потенциалов сосны на рис. 1 присутствует суточный пик (б, в), выражающий связь электрофизиологических процессов с транспортом веществ в дереве. Поздней осенью и зимой суточный пик в вариациях разности потенциалов отсутствует. Он появляется ранней весной, увеличивается по амплитуде,

достигает максимума в мае-июне, затем снижается и осенью исчезает. Иногда пик имеет двугорбую форму. Его появление и исчезновение связаны со временем пробуждения и завершения активного годового периода в жизни дерева. С повышением температуры воздуха амплитуда пика увеличивается, а с увеличением относительной влажности – уменьшается.

В отсутствие суточного пика (а, г) отчетливо проявляется влияние осадков на ход измеряемой разности потенциалов. Осадки в виде дождя понижают тренд записи, а осадки в виде снега – увеличивают его. Подобно снегу на изменение разности потенциалов сосны действует туман.

На рис. 2 показан ход изменения разности потенциалов сосны (а) и метеорологических параметров (б–г) в течение недели 17–23.09.2017 г. Гроза ночью 19.09 сопровождалась обильными осадками. На рисунке (а) сохранены импульсные помехи, часть которых вызвана грозовыми разрядами. На записях разностей потенциалов сосны заметно колебание, возникшее за 6–7 часов до грозы, имеющее нарастающую амплитуду и период около 1,8 часа. Суточный пик после грозы исчезает. Его восстановление начинается через два дня. Количество осадков (б) и влажность (в) во время грозы увеличились, температура (г) и давление (д) снизились.

Синхронные записи компонент геомагнитного поля (рис. 3, а–в) и Кр-индекса глобальной геомагнитной активности (рис. 3, г) свидетельствуют о спокойной динамике геомагнитного поля и снижении уровня шума в послегрозовую период.

На рис. 4 представлена временная зависимость разности потенциалов сосны на двухмесячном интервале 21.03–22.05.2021 г. Этот период характеризуется увеличением амплитуды суточного пика зарегистрированной разности потенциалов и высокой геомагнитной активностью. Магнитные бури (Кр-индекс 5–7) с началом, отмеченным стрелками, соответствуют бухтообразным понижениям тренда записей регистрируемой разности потенциалов.

Показания Кр-индекса и метеопараметров в этом временном интервале показаны на рис. 5. С частью магнитных бурь связано повышение температуры, атмосферного давления, осадков, относительной влажности. Значительные понижения тренда графика разности потенциалов (рис. 4) имеют место при больших значениях Кр-индекса и интенсивных дождях.

На рис. 6 показан ход разности потенциалов сосны (а) и метеопараметров (б–г) в пери-

од 16–29.10.2022 г. Из рисунка видно, что частичное солнечное затмение 25 октября 2022 г. вызвало резкие рост и падение разности электрических потенциалов (а), понижение температуры (б), давления (в) и увеличение влажности (г).

ОБСУЖДЕНИЕ

Регистрация электрической активности позволяет изучать растение как целостный организм с действующей регуляторной системой, оценить его функциональное состояние, интенсивность обменных процессов. Информативными считаются как спонтанная (фоновая) активность, так и сигналы реакции на раздражение.

Для контроля состояния тканей растений используют методы электрического импеданса и биопотенциалов. По частотной зависимости электрического импеданса тканей судят о значениях межклеточного (симпластического) и внутриклеточного (апопластического) сопротивления и емкости мембран. На частотах 10 кГц–10 МГц ток течет преимущественно через клетку, на низких частотах 100 Гц–10 кГц – через межклеточное пространство. В первом случае ячейку считают конденсатором, во втором – активным сопротивлением. На частотах выше 100 Гц материал электродов не влияет на значения импеданса. Высокочастотная составляющая импеданса характеризует диэлектрическую проницаемость мембран и поляризацию жидкого диэлектрика клетки.

Уменьшение низкочастотной составляющей импеданса связано с повреждением мембраны, например, в результате действия низких температур. Низкочастотные импедансные измерения, в частности, используют для изучения сезонной динамики прекамбиально-го комплекса тканей стволов сосен [2].

По сравнению с импедансометрией метод биопотенциалов технически более прост. В нем фиксируют разность электрических потенциалов между участками тканей высших растений, возникающую при переносе ионов калия и хлора через клеточные мембраны. Эту величину используют для характеристики физиологического состояния растений. С ее помощью диагностируют посадочный материал, выявляют опасные деревья. Биопотенциалы применяют при изучении реакций растений на термические раздражители, ритмический, импульсный звук, световое раздражение, контактное прикосновение [1].

Разность потенциалов вдоль ствола сосны формируется физическими и биологически-

ми процессами. Физиологическим процессом, определяющим суточные пики (рис. 1, б, в), является транспирация – движение жидкости от корней вверх по растению и испарение ее через устьица в окружающую среду [19]. Перекачивая и испаряя жидкость, растение регулирует температуру и поступление продуктов в зону фотосинтеза. Солнечная радиация открывает устьица. Температура, атмосферное давление, скорость ветра и влажность регулируют скорость диффузии молекул воды. Оптимальное сочетание внешних и внутренних факторов для транспирации на этом участке приходится на конец мая – июнь.

Разность потенциалов зависит от геоэлектрического поля и электропроводности воздушного зазора между электродами. Геоэлектрическое поле принимает непосредственное участие в формировании разности потенциалов вдоль ствола сосны. Электрическое сопротивление межэлектродного воздушного зазора шунтирует сопротивление тканей растения. На суточный ход геоэлектрического поля в условиях «хорошей погоды» влияют утренний конвективный генератор, распределение аэрозолей по высоте атмосферы и унитарный ход, отражающий изменение мощности генераторов глобальной атмосферной электрической цепи [11].

Заметное влияние на геоэлектрическое поле и электропроводность воздуха оказывают осадки. Во время и после дождя малоподвижные тяжелые отрицательные ионы, накапливающиеся у поверхности Земли, увеличивают отрицательный заряд поверхности, уменьшают проводимость приземного слоя атмосферы и в конечном итоге увеличивают напряженность геоэлектрического поля (рис. 1, а). При нормальных условиях напряженность электрического поля Земли у поверхности составляет около 130 В/м; во время осадков и гроз достигает значений порядка 16 000 В/м. Во время снега и тумана наличие в атмосфере легких подвижных положительных ионов увеличивает ее электропроводность, а их комбинация с отрицательными ионами снижает напряженность геоэлектрического поля. В некоторых случаях полярность разности электрических потенциалов меняется (рис. 1, г).

Радиоактивные излучения горных пород часто предшествуют землетрясениям. Их действие на электрическое поле Земли аналогично дождю. Они ионизируют воздух, вызывают конденсацию паров воды на ионах, концентрацию тяжелых отрицательных ионов вблизи земной поверхности [8].

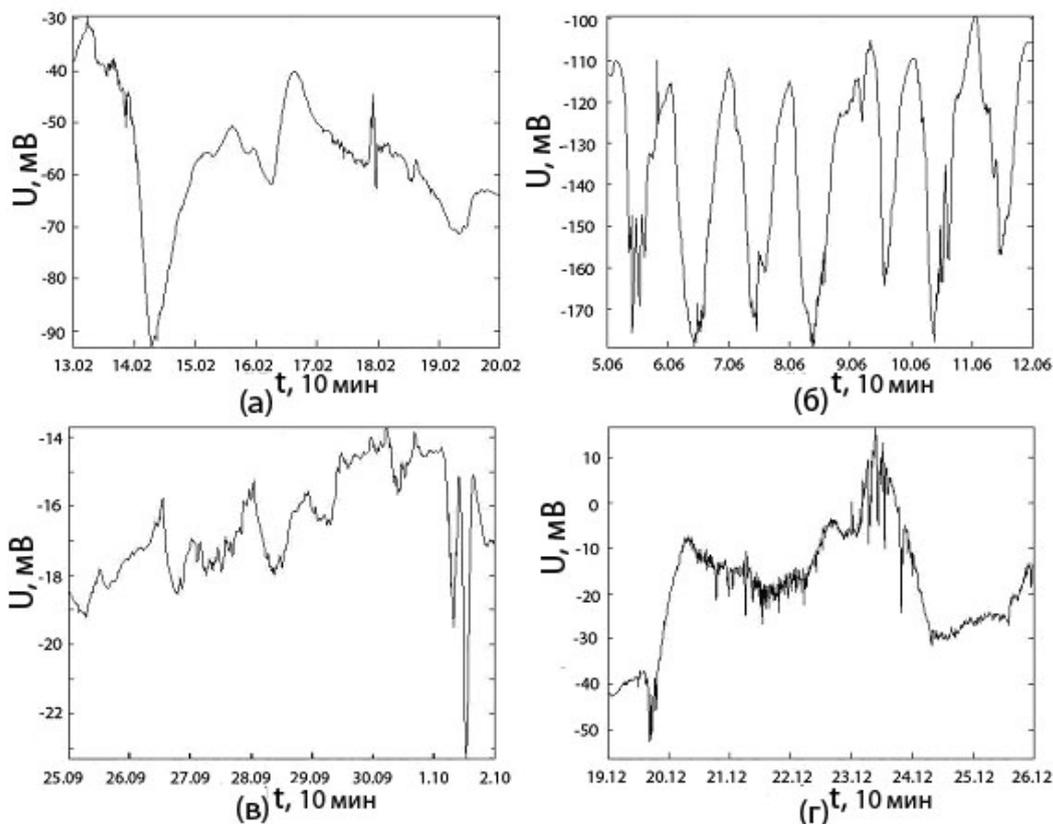


Рис. 1. Временные зависимости разности электрических потенциалов сосны в разные месяцы года: 13–19.02.2022 (а), 05–11.06.2022 (б), 25.09–01.10.2022 (в), 19–25.12.2021 (г)

Fig. 1. Time dependences of the difference in electrical potentials of a pine tree in different months of a year: 13–19.02.2022 (a), 05–11.06.2022 (б), 25.09–01.10.2022 (в), 19–25.12.2021 (г)

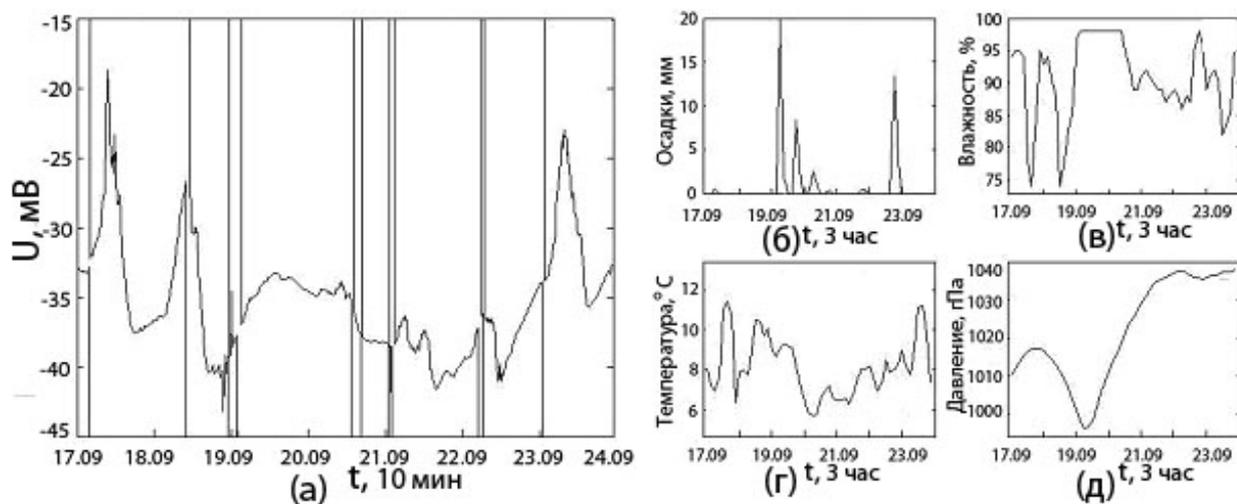


Рис. 2. Ход разности электрических потенциалов сосны (а) и метеопараметров (б–д) в интервале 17–23.09.2017

Fig. 2. Variations in the potential difference of a pine (a) and meteorological parameters (б–д) in interval 17–23.09.2017

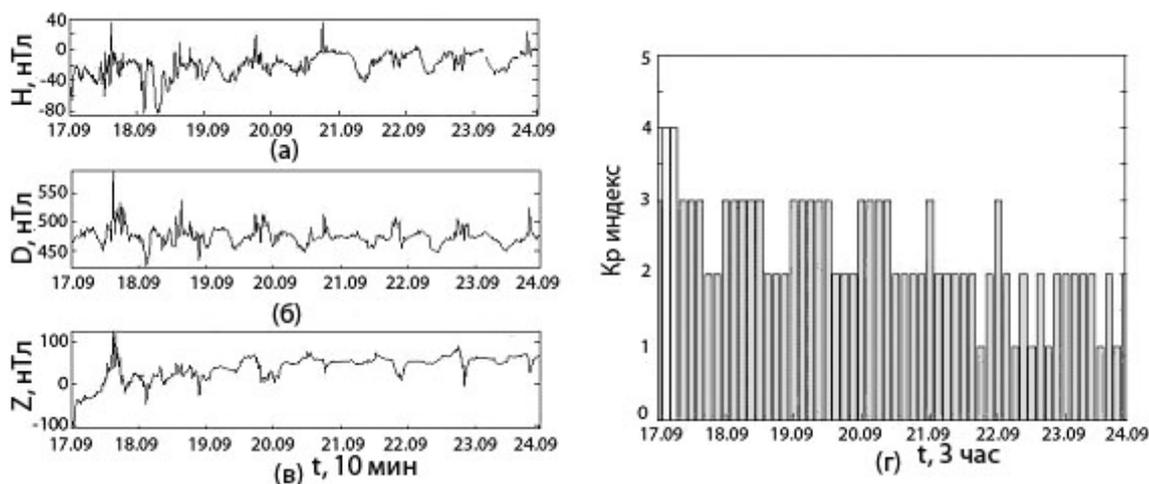


Рис. 3. Изменение компонент геомагнитного поля (а–в) и Кр-индекса (г) в течение недели 17–23.09.2017
 Fig. 3. Variations of geomagnetic field components (а–в) and Kp index (г) during a week 17–23.09.2017

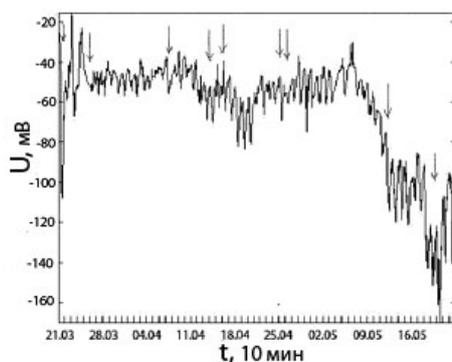


Рис. 4. Ход разности электрических потенциалов сосны за период с 21.03 по 22.05.2021 г.
 Fig. 4. Variations in the potential difference of a pine for the period from 21.03 to 22.05.2021

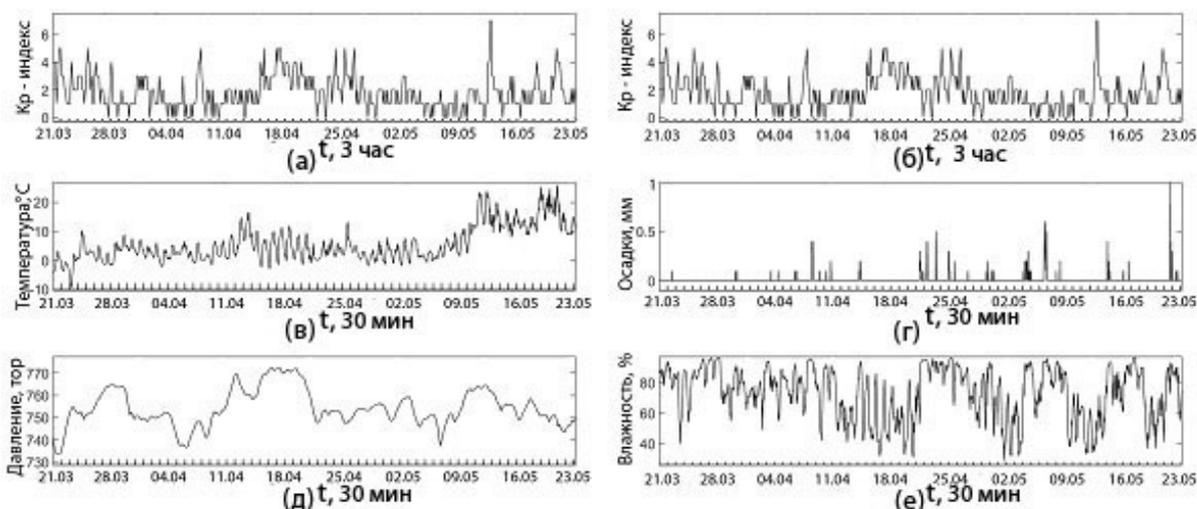


Рис. 5. Показания Кр-индекса (а, б), температуры воздуха (в), осадков (г), атмосферного давления (д), влажности (е)
 Fig. 5. Readings of Kp-index (а, б), air temperature (в), precipitation (г), atmospheric pressure (д) and humidity (е)

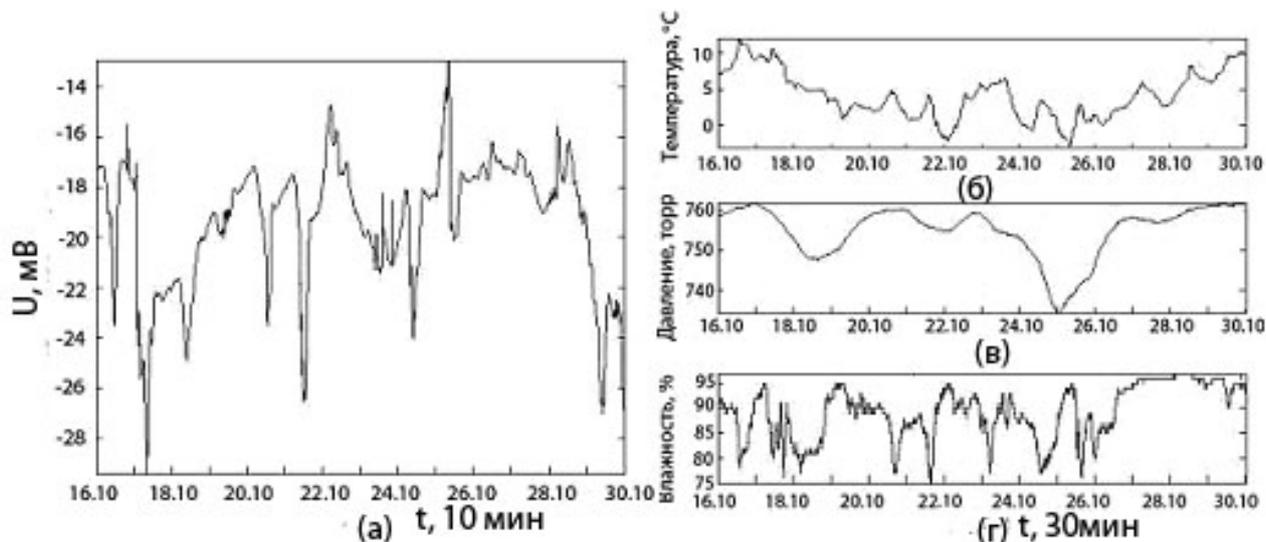


Рис. 6. Изменение разности потенциалов сосны (а) и метеопараметров (б–г) 16–29.10.2022
 Fig. 6. Progress in the potential difference of a pine (а) and meteorological parameters (б–г) 16–29.10.2022

Несмотря на многолетние исследования, изучение реакции растений на грозу остается актуальным [7]. В ответе разности электрических потенциалов на рис. 2 (а) на грозу 19 сентября 2017 г. помимо зашкаливающих электрических импульсов наблюдалось предшествовавшее грозе колебание и последующее исчезновение суточного пика транспирации. Колебание можно объяснить кружением грозового очага, исчезновение транспирации – интенсивными осадками (б) и относительной влажностью, близкой к 100 процентам (в). Понижение температуры (г), атмосферного давления (д) во время грозы вызвано экранированием солнечной радиации и осадками. Снижение геомагнитной активности (рис. 3, а–в) в послегрозовой период можно рассматривать как результат релаксирующего воздействия спрайтов молний на ионосферу и магнитосферу Земли [16], так и общей слабо возмущенной картины изменения глобального Кр-индекса (г).

Высокая сосна с большим межэлектродным расстоянием оказалась удобным объектом для изучения влияния на ее биоэлектрическую активность феноменов космической погоды. Соответствие отрицательных бухт маркерам магнитных бурь в ходе разности электрических потенциалов сосны (рис. 4) аналогично существованию бухт магнитных бурь во временной зависимости геоэлектрического поля [11]. Увеличение геомагнитной активности во время магнитной бури происходит в результате цепочки процессов, вызванных ростом магнитного поля Солнца, вспышками, эруптивными

выбросами солнечных космических лучей. Достигнув Земли, эти потоки заряженных частиц взаимодействуют с ионосферой, возмущают геомагнитное поле и практически не влияют на электропроводность нижних слоев атмосферы. Напротив, энергичные галактические космические лучи проникают в нижние слои атмосферы и создают аэрозоли по всей ее толще, увеличивая ее электропроводность. Во время магнитных бурь галактические космические лучи сильнее отклоняются магнитным полем Солнца (Форбуш-понижение [11]). Соотношение вклада этих двух компонентов в атмосферу Земли меняется в пользу солнечных космических лучей, усиливающих электрическое поле Земли, что подтверждают отрицательные бухты разности электрических потенциалов (рис. 4).

Близость временных нарушений регулярности метеорологических параметров атмосферы и больших значений индекса Кр (рис. 5) интерпретируется следующим образом. Интенсивные солнечные вспышки во время магнитных бурь, сопровождающиеся усилением радиации в ближней ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной частях спектра, считаются источниками дополнительного тепла, поступающего в нижние слои атмосферы. Это тепло вызывает аномальное повышение температуры (особенно ночью), влажности, способствует образованию облаков, осадков и гроз. Графики на рис. 5 в целом подтверждают наблюдения за метеорологическими параметрами во время магнитных бурь, выполненные в геофизической обсерватории Паратунка, за

исключением отрицательного суточного перепада атмосферного давления на вторые сутки после геомагнитной бури [11].

Кратковременная аномалия космической погоды создается солнечным затмением. Частичное солнечное затмение 25 октября 2022 года наблюдалось на большой территории Земли, в том числе на северо-западе России. В разности электрических потенциалов сосны эффект затмения представлен сигналом, состоящим из двух коротких импульсов положительной и отрицательной полярности соответственно (рис. 6, а). Загораживая часть солнечного диска, Луна экранирует поток солнечных космических лучей, не затрагивая галактические космические лучи. Связанное с этим ослабление электрического поля Земли в разности электрических потенциалов сосны на рисунке 6 (а) фиксируется положительным импульсом. С выходом Земли из лунной тени соотношение глобальных ионизаторов восстанавливается. Однако усиление геоэлектрического поля происходит при новых значениях метеорологических параметров, поскольку затмение сопровождалось недостатком тепла в оптическом диапазоне, что вызвало падение температуры примерно на 6 °С (б) и атмосферного давления (в), повышение влажности (в). В разности электрических потенциалов сосны эта фаза процесса выражена отрицательным импульсом.

В заключение раздела перечислим известные механизмы действия электрических полей на растения [7]. По одному из них, электрическое поле облегчает проникновение ионов кальция через мембраны в клетки, тем самым увеличивая скорость метаболизма, ферментации, роста клеток. Растения, по-видимому, используют сильные электростатические поля дождя и грозы как сигнал к быстрой утилизации дождя. Уже через несколько часов после грозы рост растений ускоряется. По мнению А. Л. Чижевского, электрическое поле способствует поглощению деревом положительных ионов воздуха, например положительного иона CO_2 , необходимого для фотосинтеза. Токи, протекающие через почву, ионизируют ее, вызывая активацию микроорганизмов и разложение веществ. В результате ускоряются химические и биохимические реакции, перенос влаги и превращение веществ в легкоусвояемые растениями формы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным измерений аппаратно-программных комплексов геофизической обсерватории «Петрозаводск» и Ботанического

сада ПетрГУ с привлечением базы данных Кр-индекса глобальной геомагнитной активности построены и проанализированы временные ряды разности электрических потенциалов вдоль ствола сосны, геомагнитных и метеорологических параметров за период 01.01.2017–31.12.2022 гг. Интерпретация данных биоэлектрической активности сосны проведена в предположении определяющей роли вертикальной компоненты геоэлектрического поля в формировании разности электрических потенциалов вдоль ствола.

Временной ход разности потенциалов зависит от сезона и типа осадков. Весенне-осенний режим, имеющий суточный цикл, связан с транспирацией – перемещением воды и соков от корней к верхним частям дерева с последующим испарением. Дожди понижают тренд временного хода разности потенциалов, осадки в виде снега и тумана увеличивают его. Влияние грозы на разность потенциалов сосны проявилось в предшествующих колебаниях, подавлении суточного пика транспирации, характерном изменении метеопараметров и послегрозовом снижении геомагнитной активности. Феномены космической погоды – магнитные бури и солнечное затмение – действуют на временной ход разности электрических потенциалов сосен аналогично их влиянию на электрическое поле Земли.

Неполнота используемого подхода в биологическом плане связана с выделением одной физической величины разности электрических потенциалов вдоль ствола сосны и анализом ее связей. Направлением его совершенствования, учитывая разнообразие физиологических процессов в деревьях, могло бы стать использование технологий IoT на базе Интернета вещей [17] и беспроводных устройств Tree Talker [18], позволяющих сканировать разнообразные процессы жизнедеятельности дерева, потоки вещества, фотосинтез, рост диаметра ствола, обеспечивающих оперативную обработку и передачу данных. В настоящее время эти технологии активно внедряются в научные и практические исследования [6].

Автор выражает благодарность сотрудникам Петрозаводского государственного университета Алексею Прохорову и Алексею Кабонену за возможность использовать метеорологические данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурьнин Д. А., Смирнов А. А., Прошкин Ю. А., Качан С. А., Долгалев А. П. Диагностика на фабриках растений: обзор неинвазивных методов мониторинга состояния расте-

ний для закрытых регулируемых агроэкосистем // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 6. С. 70–75. doi: 10.26897/2687-1149-2022-6-70-75

2. *Голиков Д. Ю., Монтиле А. А., Шавнин С. А.* Сезонные динамики электрического импеданса и электроемкости прикамбиального комплекса тканей ствола деревьев сосны обыкновенной, произрастающих в древостое естественного происхождения // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 4(56). С. 19–31. doi: 10.25686/2306-2827.2022.4.19

3. *Карасев В. Н., Карасева М. А., Мухортов Д. И.* Диагностика физиологического состояния хвойных деревьев по биоэлектрическим и температурным показателям // *Лесоведение*. 2020. Т. 2. С. 162–174. doi: 10.31857/S0024114820010088

4. *Лаборатория «Рентгеновская астрономия Солнца» ФИАН* [Электронный ресурс]. URL: https://lebedev.ru/ru/main-structure/main-units/optics.html?id_level=786 (дата обращения: 11.04.2024).

5. *Морозов В. А.* Комплекс для регистрации биопотенциалов растений: Дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2005. 165 с.

6. *ПетрГУ* внедряет инновационные устройства IoT мониторинга состояния деревьев // *Инновации и предпринимательство*. Петрозаводский государственный университет [Электронный ресурс]. URL: <https://ie.petrSU.ru/news/el/4580/> (дата обращения: 11.04.2024).

7. *Понятов А.* Сложная судьба электрокультуры // *Наука и жизнь*. 2020. № 8. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/39234/> (дата обращения: 11.04.2024).

8. *Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В., Дудкин С. А., Цадиковский Е. И.* Прогноз землетрясений возможен?! М.: Тривант, 2014. 144 с.

9. *Пятыгин С. С.* Распространяющиеся электрические сигналы в растениях // *Цитология*. 2008. Т. 50, № 2. С. 154–159.

10. *Сергушин П. А.* Магнитовариометр как средство измерения магнитных полей // *Вестник ИТМО*. 2006. Т. 6, № 5. С. 173–175.

11. *Смирнов С. Э.* Вариации электрического поля Земли в сейсмоактивном регионе как индикаторы сильных землетрясений и эруптивных явлений на Солнце: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский, 2018. 259 с.

12. *Шаров Н. В.* Геофизическая обсерватория «Петрозаводск» // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2014. № 1. С. 169–171.

13. *Communication in plants: Neuronal aspects of plant life* / Eds. F. Baluška, S. Mancuso, D. Volkmann. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 438 p.

14. *Davis Vantage Pro2 Plus weather station* // *Метеостанция.ру* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.meteo-station.ru/goods/davis-vantage-pro-2-plus-6162eu.html> (дата обращения: 11.04.2024).

15. *Fromm J., Lautner S.* Electrical signals and their physiological significance in plants // *Plant Cell Environ.* 2007. Vol. 30. P. 249–257. doi: 10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x

16. *Surkov V. V., Hayakawa M.* Progress in the study of transient luminous and atmospheric events: a review // *Surv. Geophys.* 2020. Vol. 41. P. 1101–1142. doi: 10.1007/s10712-020-09597-2

17. *Upadrista V.* IoT standards with blockchain. CA: Apress. Berkeley, 2021. P. 25–41.

18. *Valentini R., Marchesini L. B., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasenev V. I., Castaldi S.* New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0 // *Ann. Silvicult. Res.* 2019. Vol. 43, no. 2. P. 84–88. doi: 10.12899/asr-1847

19. *Wieser G., Gruber A., Oberhuber W.* Growing season water balance of an inner alpine Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forest // *IForest*. 2018. Vol. 11. P. 469–475. doi: 10.3832/ifer2626-011

REFERENCES

1. *Burynin D. A., Smirnov A. A., Proshkin Yu. A., Kachan S. A., Dolgalev A. P.* Screening in plant factories: a review of non-invasive plant monitoring techniques for closed regulated agroecosystems. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(6):70–75. doi: 10.26897/2687-1149-2022-6-70-75 (In Russ.)

2. *Golikov D. Yu., Montile A. A., Shavnin S. A.* Seasonal dynamics of electrical impedance and electrical capacitance of the pre-cambial complex of tissues in the trunks of Scots pine trees growing in a natural forest stand. *Vestnik PGTU. Ser. Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Vestnik of Volga Tech. Ser. Forest. Ecology. Nature Management*. 2022;4(56):19–31. doi: 10.25686/2306-2827.2022.4.19 (In Russ.)

3. *Karasev V. N., Karaseva M. A., Mukhortov D. I.* Coniferous trees bioelectric and temperature diagnostics. *Lesovedenie = Forest Science*. 2020;2:162–174. doi: 10.31857/S00241148 20010088 (In Russ.)

4. *Laboratory of X-ray astronomy of the sun, LPI RAS*. URL: https://lebedev.ru/ru/main-structure/main-units/optics.html?id_level=786 (accessed: 11.04.2024). (In Russ.)

5. *Morozov V. A.* A complex for recording plant biopotentials: PhD (Cand. of Tech.) thesis. Izhevsk; 2005. 165 p. (In Russ.)

6. *PetrSU* is introducing innovative IoT devices for monitoring the condition of trees. *Innovation and Entrepreneurship. Petrozavodsk State University*.

URL: <https://ie.petrus.ru/news/el/4580/> (accessed: 11.04.2024). (In Russ.)

7. *Ponyatov A.* The complex fate of electroculture. *Nauka i zhizn' = Science and Life.* 2020;8. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/39234/> (accessed: 11.04.2024). (In Russ.)

8. *Pulinets S. A., Uzunov D. P., Davidenko D. V., Dudkin S. A., Tsadikovskiy E. I.* Is earthquake forecast possible?! Moscow: Trovant; 2014. 144 p. (In Russ.)

9. *Pyatygin S. S.* Propagated electrical signals in plants. *Citologiya = Cytology.* 2008;50(2):154–159. (In Russ.)

10. *Sergushin P. A.* Magnetovariometer as a means of measuring magnetic fields. *Vestnik ITMO = Proceedings of ITMO.* 2006;6(5):173–175. (In Russ.)

11. *Smirnov S. E.* Variations of the Earth's electric field in a seismically active region as indicators of strong earthquakes and eruptive phenomena on the Sun: DSc (Dr. of Phys.-Math.) thesis. Petropavlovsk-Kamchatskii; 2018. (In Russ.)

12. *Sharov N. V.* Petrozavodsk Geophysical Observatory. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2014;1:169–171. (In Russ.)

13. *Baluška F., Mancuso S., Volkmann D. (eds.)*. Communication in plants: Neuronal aspects of plant life. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2006. 438 p.

14. *Davis Vantage Pro2 Plus* weather station. *Meteo-station.ru*. URL: <http://www.meteo-station.ru/goods/davis-vantage-pro-2-plus-6162eu.html> (accessed: 11.04.2024).

15. *Fromm J., Lautner S.* Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant, Cell and Environ.* 2007;30:249–257. doi: 10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x

16. *Surkov V. V., Hayakawa M.* Progress in the study of transient luminous and atmospheric events: a review. *Surv. Geophys.* 2020;41:1101–1142. doi: 10.1007/s10712-020-09597-2

17. *Upadrista V.* IoT standards with blockchain. CA: Apress. Berkeley; 2021. P. 25–41.

18. *Valentini R., Marchesini L. B., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasenev V. I., Castaldi S.* New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0. *Ann. Silvicult. Res.* 2019;43(2):84–88. doi: 10.12899/asr-1847

19. *Wieser G., Gruber A., Oberhuber W.* Growing season water balance of an inner alpine Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forest. *IForest.* 2018;11:469–475. doi: 10.3832/ifer2626-011

Поступила в редакцию / received: 11.04.2024; принята к публикации / accepted: 27.04.2024.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Белашев Борис Залманович

д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: belashev@krc.karelia.ru

CONTRIBUTOR:

Belashev, Boris

Dr. Sci. (Tech.), Leading Researcher