

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.3>

УДК 537.86

РЕФРАКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРОПОСФЕРЫ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ РЕГИОНОВ

А. С. Базарова, Р. С. Сычев, А. В. Базаров, Е. Б. Атутов, Ю. Б. Башкуев

Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2021 г.

Аннотация. Существенное влияние на распространение ультракоротких радиоволн оказывает метеорологическая обстановка, зависящая от климатических особенностей географического региона. Основной радиометеорологической характеристикой распространения УКВ является индекс рефракции N атмосферы. Приведен расчет N на основе метеоданных атмосферно-почвенного измерительного комплекса, размещенного на базе измерительного стационара в с. Сосново-Озерское Еравнинского района Республики Бурятия. Рассмотрены региональные особенности поведения индекса рефракции в Бурятии, Якутии и Монголии. Проведено сравнение с аналогичными исследованиями, проведенными по метеорологическим данным 1958-1977 гг. Выявлено, что глобальные изменения климата не оказали существенного влияния на радиометеорологическую обстановку в регионе.

Ключевые слова: радиометеорология, индекс рефракции, изменение климата, атмосферно-почвенный измерительный комплекс.

Abstract. The meteorological situation has a significant impact on the propagation of ultrashort radio waves. Refractive index of the atmosphere N is the main radio-meteorological characteristic of UHW propagation. The calculation of N is given on the basis of meteorological data of the atmospheric-soil measuring complex located on the basis of the measuring station in the village. Sosnovo-Ozerskoe, Eravninsky District, Republic of Buryatia. The regional features of the behavior refractive index in Buryatia, Yakutia and Mongolia are considered. The comparison with similar

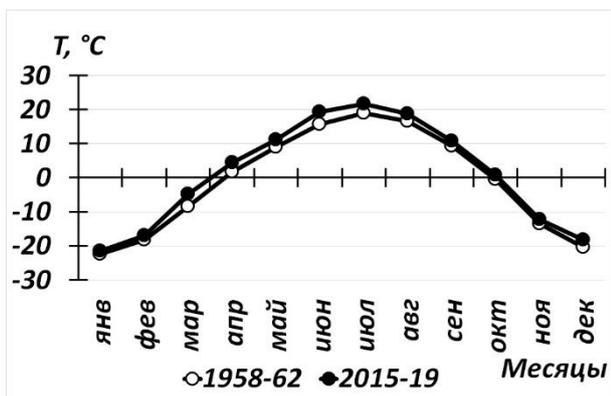
studies carried out on the basis of meteorological data from 1958-1977 was made. Global climate changes did not have a significant impact on the radio meteorological situation in the region was revealed.

Key words: radio meteorology, refractive index, climate change, atmospheric-soil measuring complex.

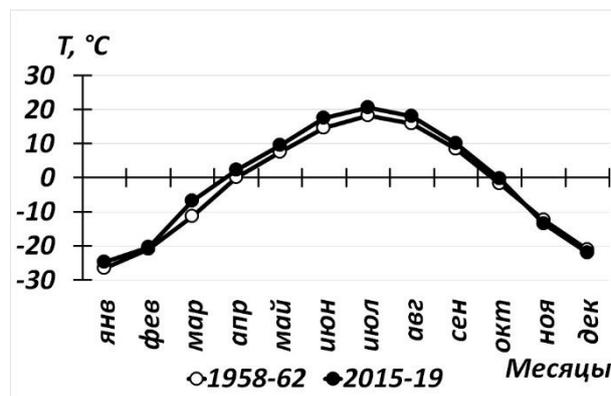
Введение

В течение последних десятилетий глобальные температуры росли со скоростью $\sim 0,2^{\circ}\text{C}$ за десятилетие [1]. Потепление неоднородно во времени, имели место и перерывы в росте температуры воздуха. Выделяются три интервала: потепление 1910–1945 гг., слабое похолодание 1946-1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1970-х годов [2]. В России изменения в сторону повышения температуры воздуха выражены сильнее, чем на планете в целом, а на территории Бурятии — и того более [3]. Так, с 1885 по 2012 гг. среднегодовая температура воздуха в Забайкалье повысилась на $2,0^{\circ}\text{C}$ [4] (отметим, что за этот период среднегодовая температура на всем Земном шаре увеличилась на $0,85^{\circ}\text{C}$ [5]). Форсированное потепление в Забайкалье подчеркивается и другими исследователями [6–8]. Примечательно, что в последнее десятилетие среднегодовая температура в Забайкалье пересекает нулевой рубеж, становясь положительной, что ранее отмечалось эпизодически [9].

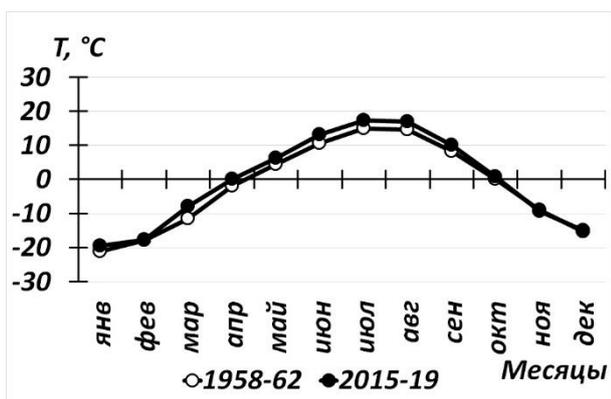
Глобальное потепление подтверждается многолетними данными станций сети Всемирной метеорологической организации и национальных сетей. Согласно данных наземных метеорологических станций [10] среднегодовая температура за последние пять лет по сравнению с периодом 1958-1962 годов увеличилась в Улан-Удэ на $2,12^{\circ}\text{C}$, в Баргузине — на $1,62^{\circ}\text{C}$, в Усть-Баргузине — на $1,66^{\circ}\text{C}$. На рис.1 показан годовой ход среднемесячной температуры по этим станциям.



а)



б)



в)

Рис.1. Сравнение годовой динамики температуры периодов 1958-1962 и 2015-2019, (а) Улан-Удэ, (б) Баргузин, (в) Усть-Баргузин.

Известно, что на режим изменений индекса рефракции атмосферы в УКВ-диапазоне существенно влияют местная климатическая обстановка [11–13]. Детальные исследования N в регионе в свое время провели Гомбоев и Цыдыпов [11], где для расчета приземных значений N использован материал наземных станций за 1958–1977 гг. В связи с этим, интересно исследовать влияние глобального потепления на региональные радиометеорологические условия.

1. Методы и материалы

Методы

Распространение радиоволн в основном определяется атмосферной рефракцией. Она заключается в том, что благодаря диэлектрической неоднородности атмосферы электромагнитные волны распространяются непрямолинейно. Разнообразие рефракционных свойств атмосферы характеризуется пространственно-временными изменениями диэлектрической

проницаемости воздуха $\varepsilon(r, t)$, и связанного с ней коэффициента преломления (индекса рефракции) $n = \sqrt{\varepsilon}$.

Поскольку n всего на три десятитысячные доли превышает единицу, Ассамблея радиосвязи Международного Союза электросвязи рекомендует использовать следующую форму записи для индекса рефракции $N = (n - 1) \cdot 10^6$ [14]. Таким образом, N показывает, на сколько миллионных долей n больше единицы. Обычно N — трехзначное число. Если, например, для нормальной тропосферы у поверхности Земли $n = 1,000325$, то N выражается числом 325. Миллионные доли индекса рефракции воздуха (т.е. единицы) называют N -единицами.

Диэлектрическую проницаемость воздуха ε и связанный с ней индекс рефракции n можно получить непосредственно с помощью радиорефрактометров. Однако последние довольно сложны, дорогостоящи и малодоступны для массовых измерений. Располагая данными об атмосферном давлении, температуре и абсолютной влажности, коэффициент преломления (или индекс преломления в -единицах) можно также вычислить по известной формуле [11,14]:

$$N = (n - 1) \times 10^6 = \frac{77,6}{T} \times \left(P + \frac{4810e}{T} \right) \quad (1)$$

где P – атмосферное давление, мбар; e – упругость водяного пара, мбар; T – абсолютная температура воздуха, К. При обычно встречающихся значениях P , T и e формула (1) считается точной в пределах 0,5% во всем диапазоне радиоволн при $\lambda \geq 1,3$ см [11]. Из формулы (1) следует, что с возрастанием P и e увеличивается и N , в то время как с увеличением T происходит уменьшение N .

Выражение (1) можно разложить как сумму двух членов [15]:

$$N = N_t + N_e \quad (2)$$

где N_t — составляющая рефракции радиоволн, учитывающая сухой воздух;

N_e — составляющая рефракции радиоволн, учитывающая влажный воздух.

причем, согласно [14],

$$N_T = 77,6 \frac{P}{T}, \quad \text{а} \quad N_e = 72 \frac{e}{T} + 3,75 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad \text{здесь } T \text{ [К]}. \quad (3)$$

Территория исследований

Метеорологические величины имеют свойство изменяться в зависимости от времени суток в течение года. В данной работе проведено исследование вариаций индекса рефракции в зависимости от изменчивости погоды в окрестностях п. Сосново-Озерское Еравнинского района Республики Бурятия. Еравнинский район, площадью 25,6 тыс. км², граничит на юго-западе с Кижингинским, на западе — с Хоринским, на севере — с Баунтовским эвенкийскими районами Бурятии, на востоке и юго-востоке проходит граница с Забайкальским краем (рис.2). Район расположен в межгорной лесостепной котловине на южной окраине Витимского плоскогорья, в бассейнах рек Уды и Витима. Основные черты современной земной поверхности района представлены следующими формами рельефа: древнее Витимское плоскогорье, Еравнинская межгорная котловина, речные долины, по которым протекают крупные реки Витим, Уда, Конда. Со всех сторон территория района окаймляется отрогами крупных хребтов: с юго-востока — отрогами Яблоневого хребта, с юга — хребтом Цаган-Хуртэй, с запада — Селенгинским среднегорьем. Самые высокие отметки плоскогорья в пределах района находятся севернее среднего течения реки Зазы (1269 м).

Климат резко континентальный с малоснежной, длительной и морозной зимой, коротким, но тёплым летом. Количество осадков в год составляет 270–310 мм в год. Самая низкая температура января опускается до минус 35–52 градусов Цельсия, а летние температуры в июле поднимаются до 25–40 градусов выше нуля. Район относится к зоне островной «вечной» мерзлоты.

Кроме того, проведено сравнение с исследованиями, проведенными на территории Бурятии и прилегающими Якутией и Монголией по метеорологическим данным 1958-1977 гг [11] (рис.3).

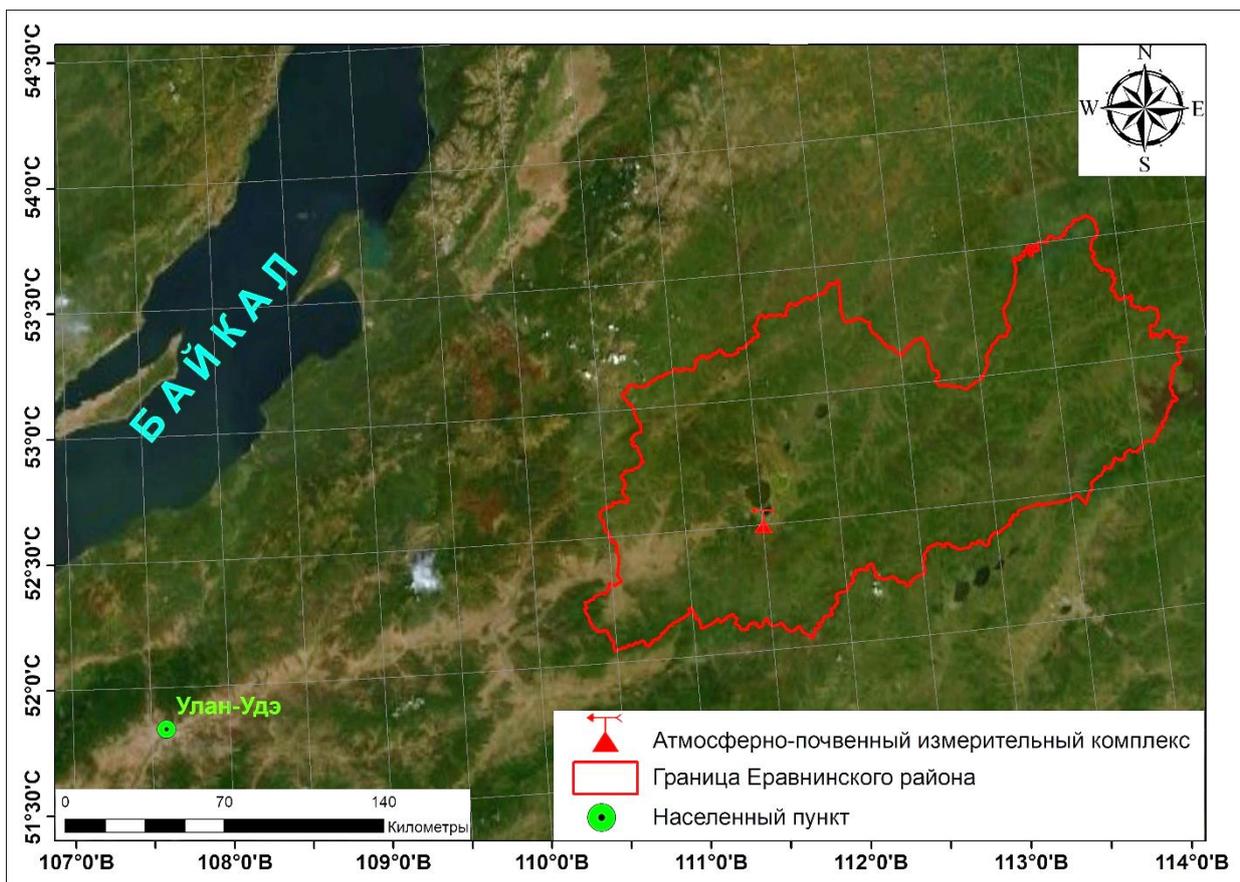


Рис.2. Местоположение пункта измерений на территории Еравнинского района.



Рис.3. Регион исследований.

Таблица 1. Координаты и высота над уровнем моря местоположения метеостанций

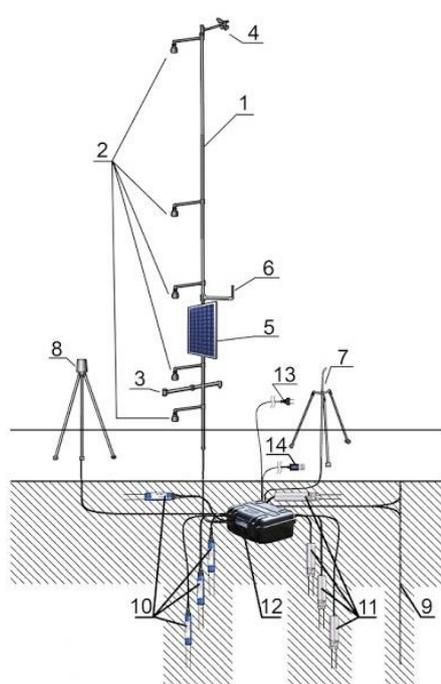
Метеостанция	широта	долгота	в.н.у.м (м)
Бурятия			
Улан-Удэ	51°49'48"	107°36'0"	515
Баргузин	53°37'12"	109°36'0"	489
Усть-Баргузин	53°25'12"	109°0'0"	461
Якутия			
Якутск	62°0'0"	129°36'0"	101
Виллюйск	63°46'12"	121°36'0"	123
Алдан	58°36'0"	125°18'0"	679
Оймякон	63°15'0"	143°6'0"	740
Монголия			
Даланзадгад	43°34'48"	104°24'36"	1465
Мандалгоби	45°46'12"	106°16'48"	1393
Сайншанд	44°54'0"	110°6'36"	938
Эрдэнэцаган	45°54'0"	115°21'36"	1076
Чойбалсан	48°4'48"	114°33'0"	747

По Бурятии выбирались станции, расположенные в разных физико-географических условиях. Используются данные за 5 лет (1958–1962). Метеоизмерения на станциях проводились 4 раза в сутки (1, 7, 13, 19 ч). Станции Улан-Удэ и Баргузин находятся вдали от больших водоемов, причем Баргузин расположен в широкой межгорной долине у подножия горного хребта, а Усть-Баргузин — на берегу озера Байкал. Для Якутии использованы данные четырех станций за 1969–1973 гг. по 8 срокам местного времени (3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 и 24 ч). Станция Якутск находится в центральной части, Виллюйск — на западе, Алдан — на юге, а станция Оймякон — на северо-востоке Центральной Якутии. Следует отметить, что станция Якутск расположена на берегу широкой Лены, а Оймякон — в плохо вентилируемом понижении

рельефа в области «полюса холода». В Монголии выбраны станции, расположенные в степных и полупустынных районах юго-востока страны: станция Даланзадгад — в юго-западной части исследуемого района равнинной местности, Мандалгоби — севернее, Сайншанд — в небольшой котловине примерно в середине исследуемого района, Эрдэнэцаган и Чойбалсан — в равнине Восточной Монголии, причем Чойбалсан на берегу реки Керулен. Расстояния между близлежащими станциями в пределах 250 - 420 км. Для анализа сезонных изменений N использованы среднемесячные данные (1973-1977). Координаты метеостанций приведены в таблице.

Измерения и наборы данных

В Еравнинской котловине проводится многолетний мониторинг атмосферных и почвенных метеопараметров атмосферно-почвенным измерительным комплексом (АПИК) [16] (рис.4).



№	Компонент	Диапазон, погрешность
1	Мачта	10 м
2	Датчики температуры и влажности воздуха	-55...+50°C, ±0,3 °C; 0 ... 100%, ±3,5 %
3	Датчик суммарной солнечной радиации (2 канала)	диапазон 0,2...10 мкМ, ±10%, 0–2000 (0-1300) Вт/м², -55...+50°C
4	Датчик скорости и направления ветра	0,9 ... 78 м/с, ±5 %; 0 ... 360°, ±7 %
5	Солнечная батарея	
6	GSM-антенна	
7	Датчик снежного покрова	0...0,7 м, ±0,05 м;
8	Датчик жидких осадков	0... 1000 мм/ч, ±5 %;
9	Зонд профиля температуры	-55...+50°C, ±0,2 °C
10	Датчики влажности грунта,	0–70% (±2%); -15...+50°C
11	Датчики проводимости воды	10...2×10³ мкСм/см; ± 20%
12	Кейс с эл. начинкой и датчиком атмосферного давления	500...1150 гПа, ±10 гПа; 375...862 мм.рт.ст., 7,5 мм.рт.ст.
13	Дублирующее питание	220 В
14	USB	

Рис.4. Схема АПИК. Нумерация компонентов в таблице совпадает с обозначениями на схеме.

АПИК проводит долговременное автоматическое измерение вертикального профиля температуры и влажности в почва и атмосфере с глубины 3,20 м до высоты 10 м. Синхронно измеряются климатические

параметры в точке измерений: скорость и направление ветра, уровень солнечной радиации, количество жидких осадков и уровень снега, а также проводимости почвенной воды. Данные считываются дистанционно через GSM-модем по сотовому каналу связи. Автономная работа системы обеспечивается использованием солнечной батареи и аккумулятора.

На десятиметровой мачте 1 на уровнях 1, 2, 4, 6 и 10 м расположены спаренные датчики 2 температуры и влажности воздуха, датчик 3 скорости и направления ветра, двухканальный датчик 4 суммарной солнечной радиации, солнечная батарея 5 и антенна 6 модема сотовой связи. Рядом с мачтой на соседних треногах установлены датчик высоты 7 снежного покрова и датчик 8 количества жидких осадков. Зонд 9 профиля температуры грунта размещен от остальных датчиков и кейса 12 на расстоянии более 1 метра и содержит цифровые датчики на уровнях 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 140, 160, 180, 220, 260, 320 см вглубь почвы. Наборы датчиков 10 влажности грунта и 11 проводимости воды измеряют соответственно профили объемной влажности почвы и солености почвенной воды. В кейсе 12 размещены автономный контроллер-логгер (АКЛ), аккумулятор, GSM-модем и датчик атмосферного давления. Измерение производится каждые 3 часа с утренним отсчетом в 7 часов. Данные через GSM-модем передаются на удаленный сервер для записи в базу данных. Обслуживание и настройка АКЛ, управляющего приборами комплекса производится посредством специального программного обеспечения.

Разработанный в Сибирском отделении Российской академии наук атмосферно-почвенный климатический комплекс АПИК проводит круглогодичный (всесезонный) мониторинг атмосферных и почвенных метеопараметров; измеряет метеопараметры почвы и атмосферы с трехчасовым временным разрешением, такой формат данных позволяет подобрать набор наземных данных более близкий ко времени пролета спутника; входящий в состав АПИК температурный зонд с более частым расположением датчиков

позволяет выявить более тонкие закономерности динамики температурного поля почвы.

Для определения вариаций индекса рефракции N нам необходимы ряды данных по температуре, влажности воздуха и атмосферному давлению.

Для сравнения поведения индекса рефракции в Бурятии, Якутии и Монголии в настоящее время с аналогичными исследованиями, проведенными по метеорологическим данным 1958-1977 гг. использована метеорологическая информация с наземных станций ресурса «Погода и климат». На данный момент на сайте представлены исторические сведения о погоде по 31788 метеостанциям России, стран СНГ, США и мира, начиная с января 1701 года и заканчивая текущей датой [10]. Данные представляют собой результаты измерений в 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 часов (UTC), за каждую дату. Для использования в формуле (1) эти данные были переведены: градусы Цельсия в Кельвины, гектопаскалы в миллибары (1 мбар = 1 гПа), проценты влажности воздуха в миллибары упругости водяного пара согласно [17]. Использованы данные за 2019 год.

2. Результаты

По данным АПИК был рассчитан индекс рефракции N в самый холодный день 22 января 2016 года и в самый знойный день 9 июля (рис.5) на высоте 1 и 10 метров.

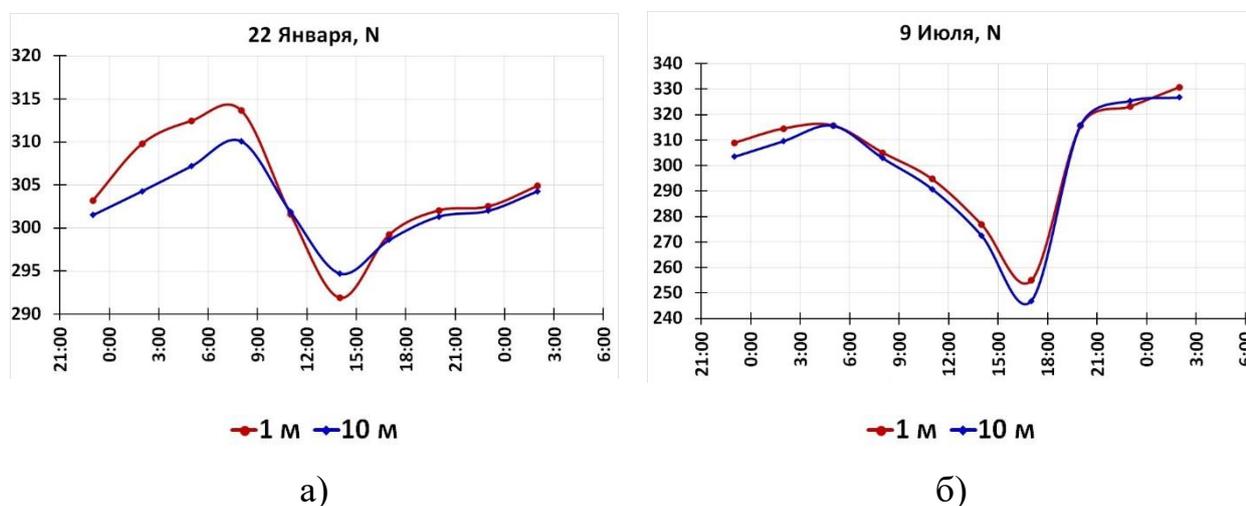


Рис.5. Вариации индекса рефракции N : (а) 22 января, (б) 9 июня 2016 года.

По оси абсцисс отложено время в часах, начиная с последнего измерения предыдущих суток и заканчивая первым измерением за последующие сутки. Следует обратить внимание, на то, что на графике (рис.5, б) ось ординат более растянута, что свидетельствует о том, что в летние дни амплитуда вариаций индекса рефракции N в течение суток больше, чем в зимние время. Зимой в дневные час (11:00-16:00) происходит инверсия N : значение на 1 м становится меньше, чем на 10 м. 9 июня такого изменения не происходит, хотя это возможно из-за повышенной турбулентности в рассмотренный день. Амплитуда зимних вариаций составляет 22 N -единицы, а летних — 60 N -единиц.

На рис.6 представлены графики метеоданных, используемых для расчетов N по формуле (1) за те же сутки.

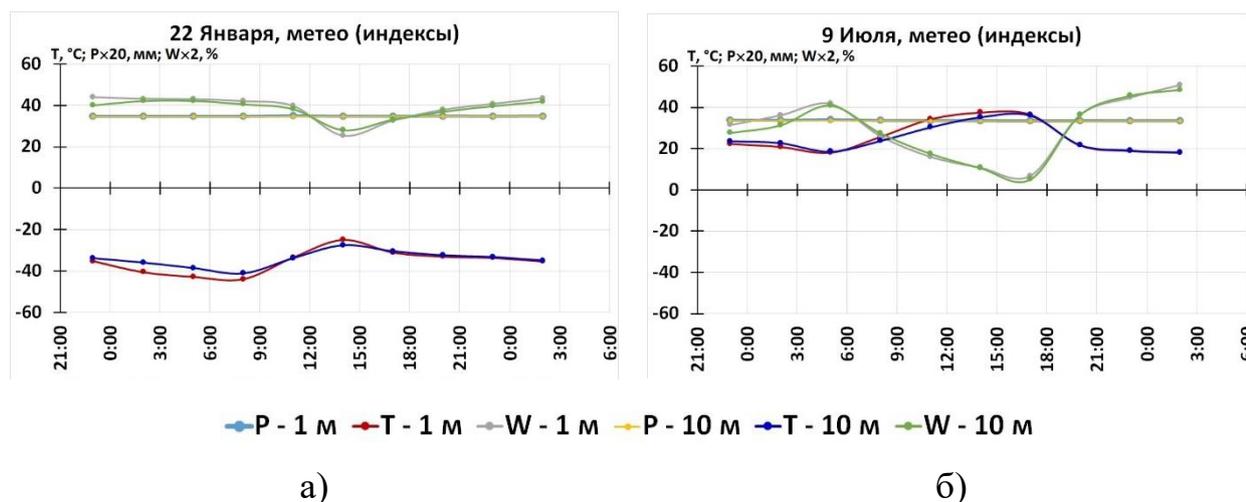


Рис.6. Вариации температуры, влажности воздуха и атмосферного давления: (а) 22 января, (б) 9 июня 2016 года.

Для того, чтобы все графики разместились на одной диаграмме, нам пришлось разделить значения P на 20, а W на 2. То есть, если на графике мы видим величину атмосферного давления 34,5, то реальное показание составляет 690 мм рт. ст., а показатель влажность 40 на графике означает влажность воздуха 80%. Сопоставление рисунков 5 и 6 показывает, что на вариации индекса рефракции N больше влияют температура и влажность воздуха, чем атмосферное давление, которое держится практически на одном уровне.

Большая амплитуда суточных колебаний N в летнее время, объясняется, вероятно, более резкими флуктуациями влажности воздуха.

Далее проведено сравнение годовой динамики N в Бурятии (рис.7), согласно [11] и рассчитанной по формуле (1) среднемесячным значениям 2019 года соответственно. Аналогичное сравнение годовой динамики N было проведено в Монголии по станциям Даландзадгад, Мандалгоби, Сайншанд, Эрдэнэцаган, Чойбалсан и Якутии по станциям Якутск, Вилюйск, Алдан, Оймякон.

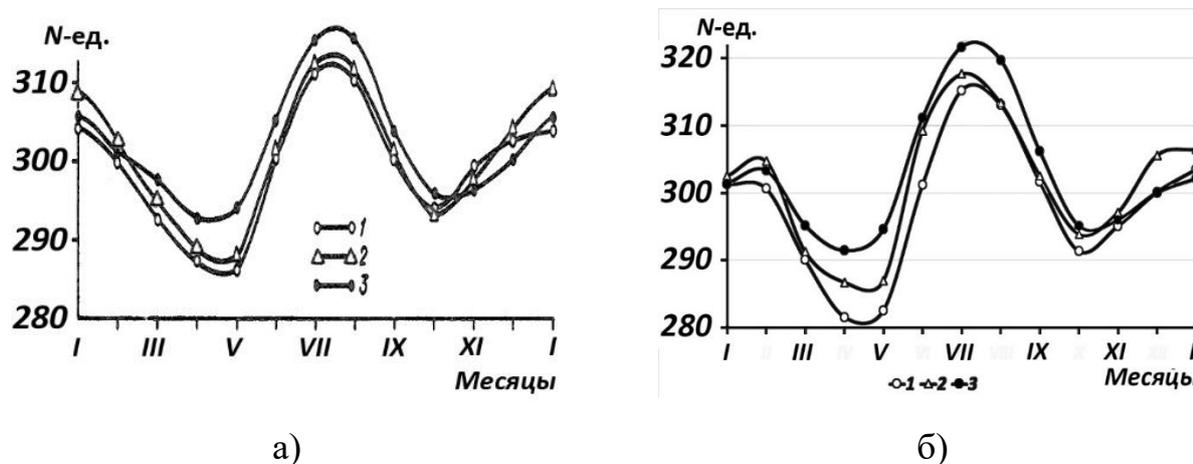


Рис.7. Годовой ход N в Бурятии: (а) согласно [11], (б) в 2019 году; 1 – Улан-Удэ, 2– Баргузин, 3 – Усть-Баргузин.

Результаты расчетов показали, что изменения климата не оказали влияния на радиометеорологическую обстановку в регионе. Во всем исследуемом регионе, как и пятьдесят лет назад, сезонный ход среднемесячных значений N имеет вид двугорбой кривой с максимумами зимой и летом, минимумами весной и осенью. При этом в Бурятии и Монголии главный максимум N приходится на июль, а в Якутии — на январь. Основной минимум сезонного хода N наблюдается в апреле–мае, а другой минимум — в октябре.

На рис. 8 показаны сезонные изменения величин N_T , N_e и N согласно [11] за 1962 год (а) и рассчитанные по формуле (3) на основании среднемесячных значений P , T и e за 2019 год (б).

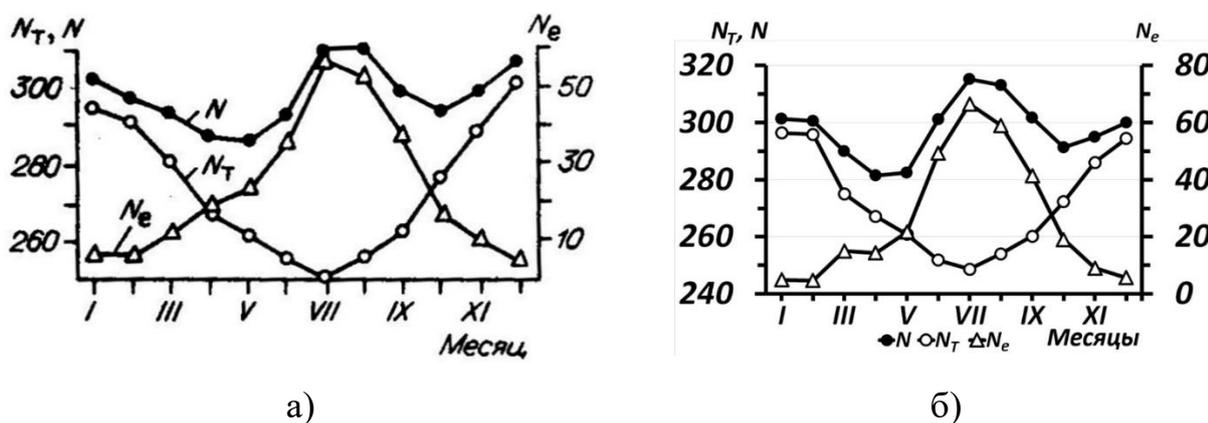


Рис.8. Годовой ход N , N_T , N_e в Улан-Удэ, (а) согласно [11], (б) в 2019 году.

Представленные результаты показывают, что зимний максимум N обусловлен исключительно низкой температурой и высоким атмосферным давлением, господствующим в исследуемом регионе. Кроме того, кривые графиков свидетельствуют о том, что летний максимум N почти полностью обуславливается относительно высоким влагосодержанием воздуха в летнее время. График N представляет собой огибающую N_T и N_e , следовательно, глубокий минимум весной и осенью обусловлен понижением N_T (одновременным повышением температуры и падением давления) и пока относительно недостаточным повышением N_e (влагосодержанием). Зимой в Якутии из-за крайне низких температур и минимальной влажности воздуха зимний максимум N_T превосходит летний максимум N_e , поэтому здесь наибольшее значение N наблюдается не летом, а зимой.

Заключение

В результате проведения радиометеорологических измерений, численных расчетов и обобщения данных региональных метеостанций определены сезонные и суточные вариации индекса рефракции N в условиях резко континентального климата востока России и Монголии.

Установлено, что изменения климата на Земле не оказали никакого влияния на радиометеорологическую обстановку в регионе. Вариации значений годового хода N лежат в тех же пределах, что и 50 лет назад. В условиях резко континентального климата северо-восточной Азии установлена ритмичность

электрического состояния приземной атмосферы и устойчивость ритмов из года в год. Во всем исследуемом регионе, как и пятьдесят лет назад, сезонный ход среднемесячных значений N имеет вид двугорбой кривой с максимумами зимой и летом, минимумами весной и осенью. В Бурятии и Монголии главный максимум N приходится на июль, а в Якутии — на январь.

Полученные результаты и разработанные методики радиометеорологического зондирования измерителями АПИК на границе раздела «атмосфера-подстилающая среда» могут быть использованы при инженерных расчетах УКВ радиолиний в восточных районах России. Результаты исследования радиометеорологических свойств приземной атмосферы в целом привели к созданию банка данных метеорологических и электрофизических свойств тропосферы, учитывающих её слоистую структуру. Эти данные необходимы при освоении востока России и особенно арктических районов Республики Саха (Якутия).

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта 0270-2021-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

Литература

1. Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K. Global surface temperature change. *Rev. Geophys.* 2010. Vol. 48. No.RG4004. P. 1–29.
2. Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З., Дабаева Д.Б., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Куликов А.И. Уровенный режим озера Байкал: ретроспектива и современное состояние. *Водное хозяйство России.* 2017. №2. С.4–18.
3. Смирнова И.И., Куликов А.И., Куликов М.А. Термическое состояние деятельного слоя в криолитозоне Байкальского региона в контексте глобального потепления. *Вестник ВСГУТУ.* 2012. Vol.39. № 4. С.227–233.
4. Обязов В.А. Тенденции многолетних изменений речного стока в Забайкалье

- в многоводные и маловодные периоды. *Доклады РАН*. 2013. Vol.450. №6. С.713.
5. Кокорин А.О. *Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК*. Москва, Всемирный фонд дикой природы (WWF). 2014. 80 с.
 6. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата*. Москва, 2008. 228 с.
 7. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата*. Москва, 2008. 288 с.
 8. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. *Метеорология и гидрология*. 2004. №4. С.50–66.
 9. Badmaev N.B., Bazarov A.V., Sychev R.S. Forest Fire Danger Assessment Using Meteorological Trends: Case Study. In: Baranovsky N.V., editor. *Predicting, Monitoring, and Assessing Forest Fire Dangers and Risks*. IGI Global, 2020. P.183–208.
 10. *Погода и климат* [электронный ресурс]. 2020. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 26.10.2020).
 11. Гомбоев Н.Ц., Цыдыпов Ч.Ц. *Рефракционные свойства атмосферы континентальных районов*. Новосибирск, Наука. 1985. 125 с.
 12. Цыдыпов Ч.Ц. *Распространение ультракоротких радиоволн в гористой местности*. Новосибирскб Наука. 1977. 205 с.
 13. Батуева Е.В., Дарижапов Д.Д. *Рефракционные свойства тропосферы дальневосточных районов России*. Новосибирск, Издательство СО РАН, 1999. 142 с.
 14. Рекомендация МСЭ-R P.453-12. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции. Geneva: ITU, 2017. 25 с.
 15. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В., Лухнева О.Ф., Саньков В.А. Влагодержание тропосферы в Байкальском регионе по данным GPS измерений. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2016. № 3.

<http://jre.cplire.ru/jre/mar16/10/text.pdf>

16. Базаров А.В., Бадмаев Н.Б., Кураков С.А., Гончиков Б-М.Н. Мобильный измерительный комплекс для сопряженного контроля атмосферных и почвенных параметров. *Метеорология и гидрология*. 2018. №4. С.104–109.
17. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Seventh ed. Geneva: World Meteorological Organization, 2008. № 8. 681 p.

Для цитирования:

Базарова А.С. Сычев Р.С., Базаров А.В., Атутов Е.Б., Башкуев Ю.Б. Рефракционные свойства тропосферы Байкальской природной территории и прилегающих регионов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.3>