

УДК 551.510

Вариации температурного режима пограничного слоя атмосферы в регионах с различной орографией

В.А. Банах¹, А.В. Фалиц¹, А.А. Сухарев¹, Н.П. Красненко^{2,3}, А.С. Раков^{2,3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

³Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Поступила в редакцию 19.06.2018 г.

Представлены результаты сравнительных исследований пространственно-временной изменчивости температуры в пограничном слое атмосферы в г. Томске и в прибрежных зонах озер Байкал и Иссык-Куль. Выполненные с использованием температурного профилера МТР-5 измерения показывают, что в летнее время режимы термической расслоенности нижнего километрового атмосферного слоя в городских условиях при отсутствии близлежащих крупных водоемов и в горной местности на побережьях крупных водоемов существенно различаются. Определены типы стратификации и параметры пограничного слоя атмосферы в регионах измерений.

Ключевые слова: пограничный слой, термическая стратификация, профилер, градиент температуры; boundary layer, thermal stratification, profiler, temperature gradient.

Введение

Мониторинг температуры в пограничном слое атмосферы является одним из ключевых компонентов прогностических систем переноса загрязнений и качества воздуха. Такие системы используют численные модели атмосферы, для расчетов по которым требуется задание внешних параметров, определяемых либо из независимых измерений, либо из крупномасштабных метеорологических моделей. Важным параметром для прогноза качества воздуха является высота пограничного слоя, верхняя граница которого препятствует проникновению тепловых потоков и примесей в вышележащие слои атмосферы. Опасность накопления примесей и ухудшения качества воздуха возрастает при малых высотах пограничного слоя, когда в атмосфере реализуются условия нейтральной и устойчивой температурной стратификации. Выяснению роли стратификации в формировании планетарных пограничных слоев посвящено множество исследований. В частности, в работах С.С. Зилитинкевича [1–3] показано, что для прогноза высоты пограничного слоя и, следовательно, качества воздуха необходимо знать не только турбулентный поток плавучести у подстилающей

поверхности, но и частоту Вьяйсяля–Брента в свободной атмосфере над верхней границей пограничного слоя, значение которой определяется вертикальным градиентом потенциальной температуры на этих высотах.

Не всегда возможно определить высотные профили температуры и тип стратификации в нижнем атмосферном слое с нужным пространственным разрешением из регулярных аэрологических данных. Высотные метеорологические мачты являются уникальными сооружениями и не могут обеспечить измерение требуемых для моделирования входных параметров в нужном месте. Использование дистанционных методов зондирования атмосферы во многом позволяет решить задачу получения метеорологической информации с нужным пространственным и временным разрешением.

К приборам, позволяющим дистанционно измерять температуру на высотах пограничного слоя атмосферы, в частности, относятся приборы, реализующие методы микроволновой радиометрии [4–6], например температурный профилер МТР-5, разработанный и изготавливаемый в России [5–7] и получивший широкое применение на практике и в атмосферных исследованиях [8–13]. Среди публикаций по этому направлению есть как работы, рассматривающие методические вопросы микроволновой радиометрии атмосферы и анализирующие возможности температурных профилеров [5–7, 11], так и работы по исследованию изменчивости температурного режима пограничного слоя атмосферы в зависимости от внешних условий [8–13]. В частности,

* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Андрей Вячеславович Фалиц (falits@iao.ru); Артем Андреевич Сухарев (sukharev@iao.ru); Николай Петрович Красненко (krasnenko@imces.ru); Александр Сергеевич Раков (dipole@ngs.ru).

с использованием МТР-5 были проведены измерения температуры на высотах пограничного слоя атмосферы в различных регионах России [8, 9, 12, 13].

В настоящей работе представлены результаты исследований особенностей температурного режима пограничного слоя атмосферы в прибрежной зоне крупных водоемов – Байкала и Иссык-Куля – с помощью профилера МТР-5.

Описание экспериментов

Измерения на Байкале проходили в период с 21.07 по 5.08.2017 г. на окраине пос. Листвянка на территории Байкальской астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (51,405230° с.ш., 104,673121° в.д.; высота 660 м над ур. м.). Температурный профилимер МТР-5 располагался на краю ровной площадки в 15 м от здания Большого солнечного вакуумного телескопа на высоте 200 м относительно водной поверхности Байкала. Вертикальная плоскость, в которой выполнялось сканирование антенной радиометра в сторону Байкала, была ориентирована под углом 190° относительно севера (рис. 1). Вместе с радиометром для измерения температуры в приземном слое исполь-

зовались акустические метеостанции, располагавшиеся на мачте на высотах 3 и 10 м от поверхности земли на расстоянии 10 м от здания телескопа.

Измерения на Иссык-Куле проводились с 23 по 27.09.2017 г. на территории научного стационара Киргизской Академии наук в с. Кара-Ой (42,612712° с.ш., долгота 77,008503° в.д.; высота 1609 м над ур. м.). Профилимер МТР-5 был установлен на балконе здания, направление сканирования в вертикальной плоскости было выбрано в сторону оз. Иссык-Куль под углом 270° относительно севера (рис. 1). На расстоянии 15 м от здания, где размещался профилимер, на ровной площадке была установлена мачта с акустической метеостанцией АМК-03 на высоте 4 м.

Измерения в Томске проводились с 8 по 14.07.2017 г. и с 11.08 по 14.09.2017 г. Профилимер размещался на крыше здания Института оптики атмосферы (56,475448° с.ш., 85,048115° в.д.), вертикальное сканирование выполнялось в плоскости, направленной под углом 300° относительно севера (рис. 1). Данные измерений профилей температуры использовались для сравнительного анализа динамики изменения температуры в городских условиях и вблизи больших природных водоемов (озер Байкал и Иссык-Куль).

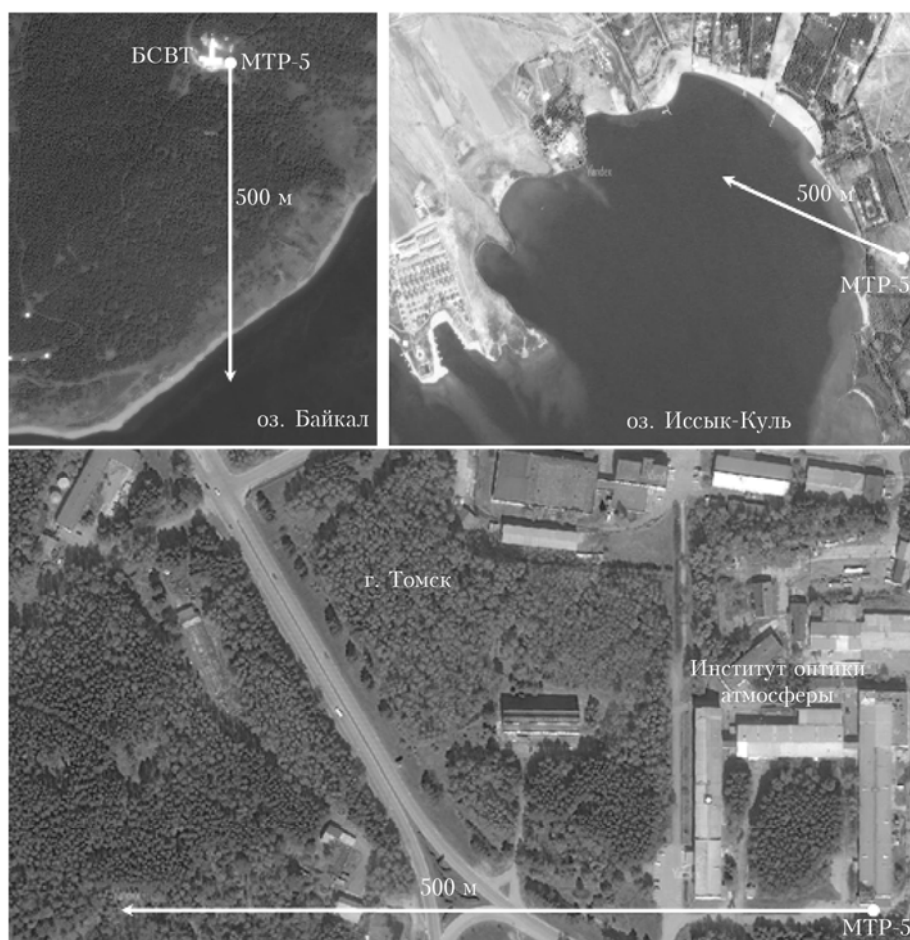


Рис. 1. Карта местности и трассы измерений на Байкале (вверху слева), Иссык-Куле (вверху справа) и в Томске (внизу)

Результаты измерений

Измерение высотных профилей температуры T от 0 до 1000 м осуществлялось непрерывно с периодичностью 3 мин. Нулевая высота соответствует высоте установки прибора в месте проведения измерений. На рис. 2 показаны пример суточных изменений температуры на высотных уровнях с шагом дискретизации 100 м и суточные изменения на тех же уровнях средней за один час температуры 8.07.2017 г. в Томске.

Аналогичные данные получены во время измерений на Байкале и Иссык-Куле.

Из данных для средней за час температуры по формуле $\frac{d \langle T(h) \rangle}{dh} = \frac{\langle T(h_{i+1}) \rangle - \langle T(h_i) \rangle}{h_{i+1} - h_i}$ были рассчитаны усредненные за период измерений вертикальные градиенты температуры с шагом по высоте 100 м на высотах от 0 до 1000 м, т.е. в расчетной

формуле $h_i = i \cdot 100$ м, $i = 0, 1, \dots, 10$. Полученные значения вертикального градиента $\frac{d \langle T(h) \rangle}{dh}$ сравнивались с сухоадиабатическим градиентом температуры $\gamma_a = 0,98 \cdot 10^{-2} \text{ Км}^{-1}$. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Из графиков суточной динамики градиента температуры в Томске следует, что при отсутствии близлежащих крупных водоемов в летнее время наблюдается периодическая смена термической стратификации с устойчивой $\left(\frac{d \langle T \rangle}{dh} > -\gamma_a\right)$ ночью на

неустойчивую $\left(\frac{d \langle T \rangle}{dh} < -\gamma_a\right)$ в дневные часы во всем нижнем 700-метровом слое атмосферы (рис. 3, *a*). Однако на высотах 400–600 м стратификация становится устойчивой на сравнительно короткое время с 03:00 до 10:00. (Здесь и далее в статье указано

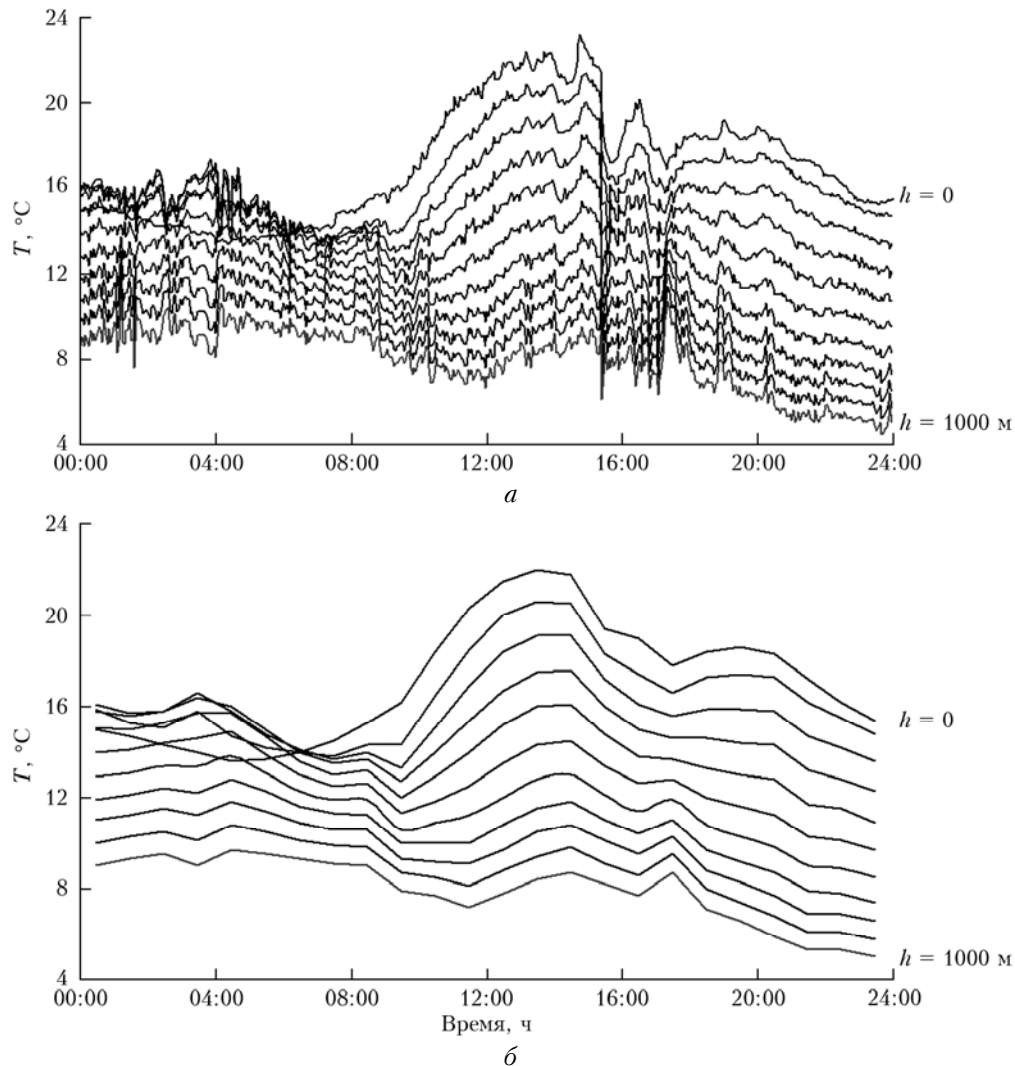


Рис. 2. Пример суточных изменений температуры на высотах от 0 до 1000 м, измеренной профилимером МТР-5 с шагом дискретизации по времени 3 мин (*a*), и суточный ход средней за час температуры 8.07.2017 г. в Томске (*б*)

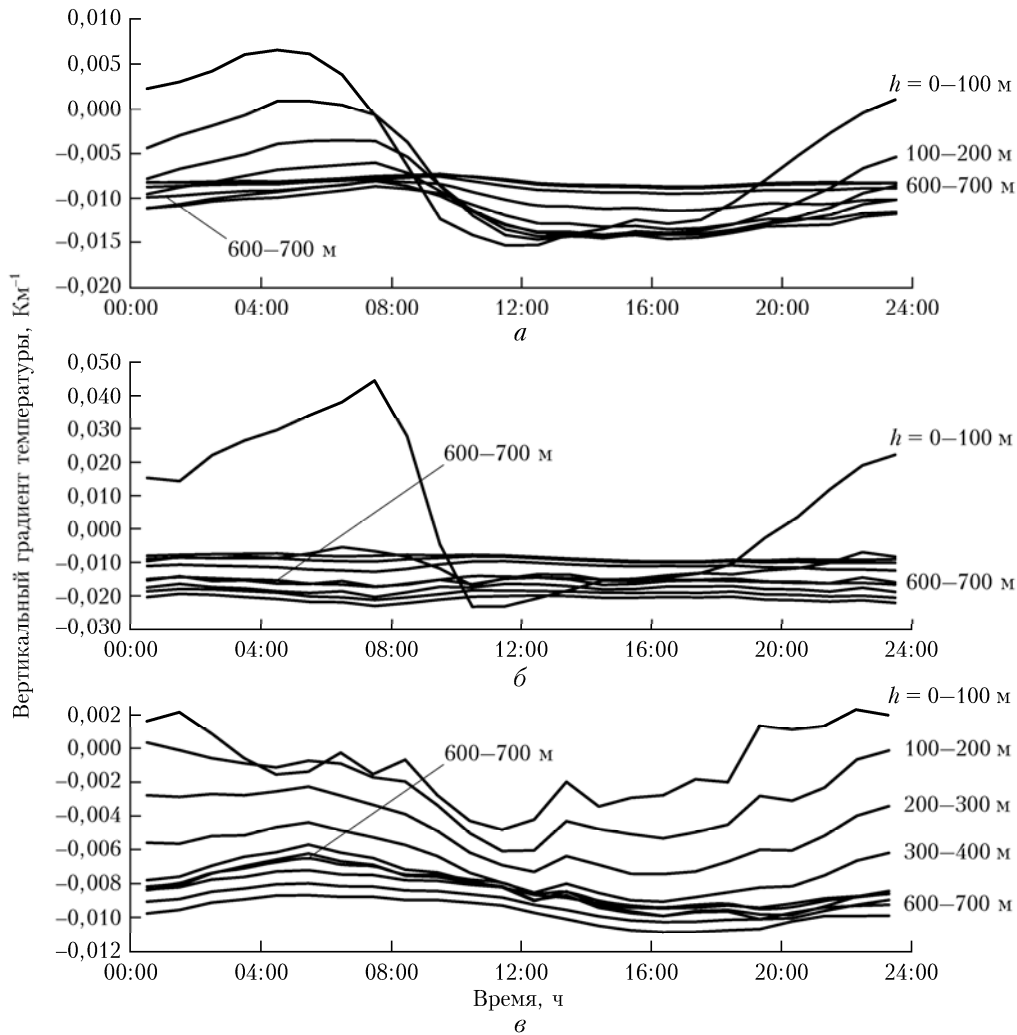


Рис. 3. Суточный ход среднего за час вертикального градиента температуры, усредненный за время измерений: на территории ИОА СО РАН в Томске (а), на побережьях озер Иссык-Куль (б) и Байкал (в)

местное время.) Большую часть суток на этих высотах стратификация была неустойчивой. На высотах 700–1000 м условия слабоустойчивой стратификации во время измерений в Томске выполнялись круглосуточно. Из представленных на рис. 3, б данных видно, что, в отличие от Томска, суточная смена стратификаций во время измерений на Иссык-Куле происходила лишь в нижнем 200-метровом слое атмосферы. Условия устойчивой и очень слабоустойчивой стратификации на Иссык-Куле в этом слое складывались примерно с 18:00 до 09:00. С 09:00 до примерно 18:00 в нижнем 200-метровом слое реализовались условия неустойчивой термической стратификации.

Усредненный за весь период измерений суточный ход среднего за час турбулентного потока тепла H на высоте 4 м, рассчитанного по данным измерения температуры и скорости ветра акустической метеостанцией (рис. 4), согласуется с поведением температурного градиента, рассчитанного по данным измерений температуры профилимером в нижнем 100-метровом слое атмосферы. Турбулентный поток тепла у подстилающей поверхности расчи-

тывается по формуле $H = \langle \theta' w' \rangle c_p \rho$, где $\theta' = \theta - \langle \theta \rangle$, $w' = w - \langle w \rangle$, $\theta(h) = T(h) - \gamma_a$ – потенциальная температура; w – вертикальная компонента скорости ветра; h – высота над подстилающей поверхностью; c_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность воздуха (угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций).

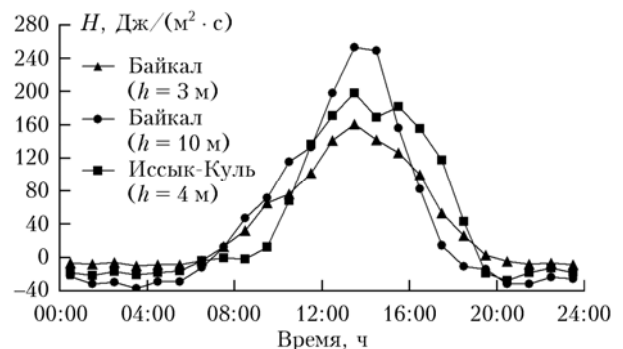


Рис. 4. Усредненный за весь период измерений суточный ход среднего за час турбулентного потока тепла в приземном слое атмосферы на Байкале и Иссык-Куле

Выше 200 м на всех высотных уровнях измерений температурные градиенты остаются практически постоянными в течение суток. На высотах 200–700 м их значения соответствуют условиям неустойчивой температурной стратификации независимо от времени суток. С дальнейшим увеличением высоты градиенты по величине становятся близкими к сухадиабатическому и немного превышают его, т.е. на высотах 700–1000 м реализуются, как и в Томске, условия нейтральной и слабоустойчивой температурной стратификации независимо от времени суток.

На Байкале в июле–августе 2017 г. на высотных уровнях измерения температуры профилимером практически всегда реализовывалась устойчивая термическая стратификация независимо от времени суток (рис. 3, в). Лишь на высотах 800–1000 м относительно высоты профилемера (1000–1200 м над водной поверхностью Байкала) примерно с 13:00 до 21:00 реализовывались условия слабо неустойчивой стратификации. На рис. 5 показан суточный ход вертикального градиента температуры в нижнем 10-метровом слое атмосферы над подстилающей поверхностью, рассчитанный по данным измерений акустических метеостанций на высотах 3 и 10 м.

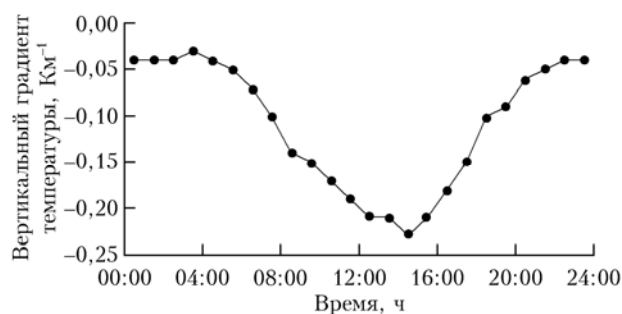


Рис. 5. Суточный ход среднего за час вертикального градиента температуры в приземном слое атмосферы, усредненный за весь период измерений на Байкале

Видно, что вследствие сильного прогрева земной поверхности в дневное время и ее выхолаживания ночью в приземном слое в период измерений происходит регулярная смена термической стратификации с устойчивой на неустойчивую и обратно примерно в 07:30 и 18:30. Суточный ход температурного градиента в вертикальном направлении согласуется с суточным ходом турбулентного потока тепла, рассчитанного по данным измерений акустических метеостанций на высотах 3 и 10 м. Однако градиент, рассчитанный по данным профилемера для нижнего 100-метрового слоя (см. рис. 3, в), даже в период максимального прогрева земной поверхности в точке измерений с 12:00 до 16:00 (см. рис. 4) хоть и минимален, но его значения превышают $-\gamma_a$. То есть на больших вертикальных масштабах стратификация является устойчивой вследствие превалирующего влияния на измерения профилемера воздушных масс со стороны Байкала, более холодных внизу за счет низкой температуры байкальской воды. В районе Листвянки температура воды в Байкале в период измерений не превышала 13 °С при температуре воздуха в течение суток от 16 до 22 °С. Слабая неус-

тойчивость начинает развиваться во второй половине дня на высотах выше километра от поверхности воды, на которых охлаждающее действие Байкала перестает сказываться.

Согласно [1–3] высота условно нейтрального и устойчивого пограничного слоя атмосферы h_E определяется из соотношения

$$\frac{1}{h_E^2} = h_n^{-2} \left[1 + \left(\frac{C_R}{C_{CN}} \right)^2 \mu_N + \left(\frac{C_R}{C_{NS}} \right)^2 \mu \right], \quad (1)$$

где

$$h_n = C_R \frac{u_*}{|f|} \quad (2)$$

– высота истинно нейтрального по терминологии [1–3] пограничного слоя, $f = 2\Omega \sin\varphi$ – параметр Кориолиса, Ω – угловая скорость вращения Земли, φ – широта,

$$u_* = \sqrt{-(u'w')} \quad (3)$$

– скорость трения, $u' = u - \langle u \rangle$, u – продольная компонента скорости ветра; $\mu_N = N/|f|$, N – частота Вайсяля–Брента в свободной атмосфере над верхней границей пограничного слоя; $\mu = u_*/(|f|L)$, L – масштаб Монина–Обухова; $C_R = 0,6$; $C_{CN} = 1,36$; $C_{NS} = 0,51$ – константы. Частота Вайсяля–Брента определяется вертикальным градиентом потенциальной температуры: $N = \left(\beta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{1/2}$, где $\beta = g/\theta$, g – ускорение свободного падения. Масштаб Монина–Обухова рассчитывается по формуле

$$L = -u_*^3 / (\kappa \beta \langle \theta'w' \rangle), \quad (4)$$

где $\kappa = 0,4$ – постоянная Кармана.

Из формулы (1) следует, что факторами, ограничивающими высоту пограничного слоя в условиях нейтральной и устойчивой термической стратификации, являются турбулентный поток потенциальной температуры $\langle \theta'w' \rangle$ и частота Вайсяля–Брента N .

На рис. 6 и 7 показаны усредненные за период измерений суточные изменения средних за час значений потенциальной температуры и ее вертикального градиента в Томске, на Байкале и Иссyk-Куле. Из анализа представленных на рис. 7, а данных следует, что градиент потенциальной температуры в Томске на высотах 700–1000 м изменяется в пределах 0,001–0,0025 Км⁻¹. С учетом того, что потенциальная температура на высоте 1000 м равна примерно 16 °С (289 К) (рис. 6), частота Вайсяля–Брента во время измерений в Томске изменялась в пределах 0,006–0,009 Гц.

Примерно такие же значения частоты Вайсяля–Брента наблюдаются на Иссyk-Куле. Во время измерений на побережье оз. Иссyk-Куль вертикальный градиент потенциальной температуры в слое от 900 до 1000 м принимает минимальные значения

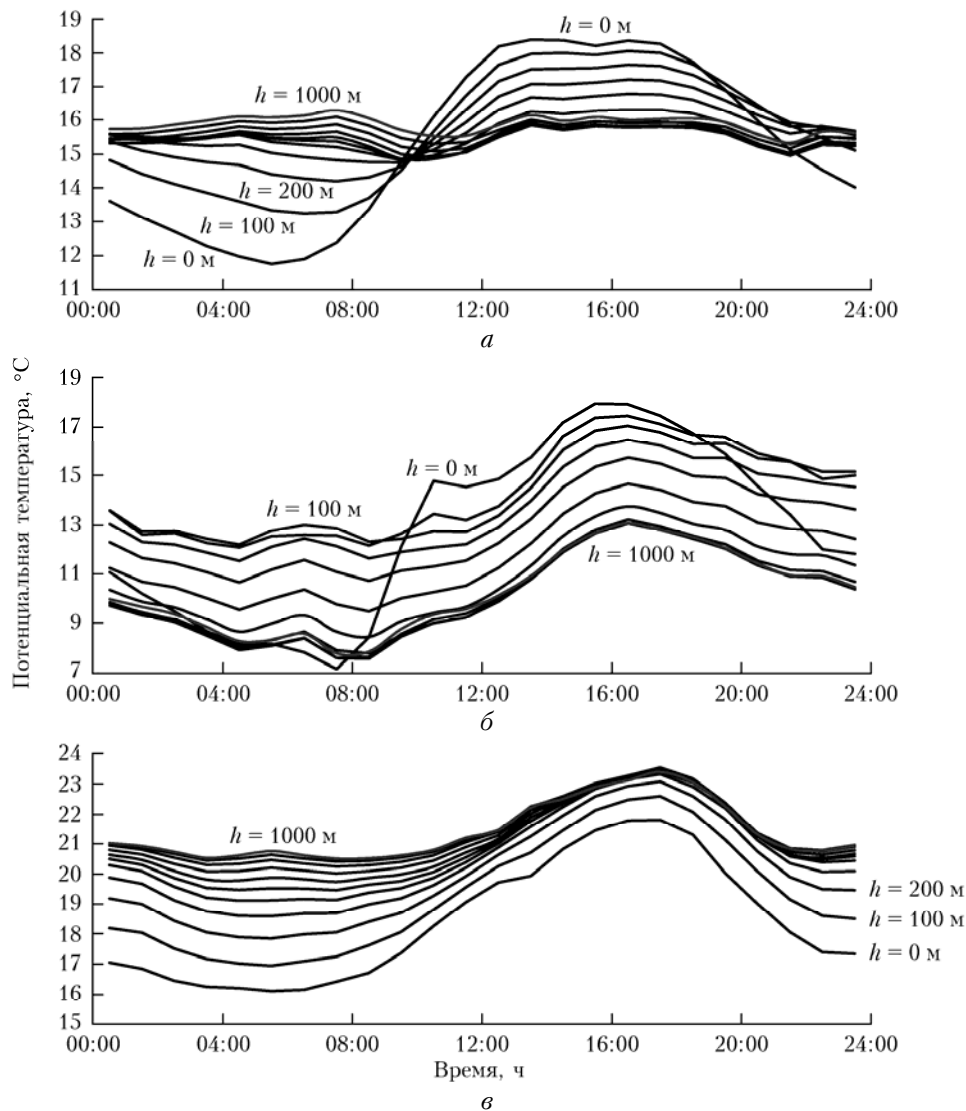


Рис. 6. Суточные изменения средней за час потенциальной температуры, усредненной за время измерений: на территории ИОА СО РАН в Томске (а), на побережьях озер Иссык-Куль (б) и Байкал (в)

менее $0,001 \text{ Км}^{-1}$ в период с 16:00 до 23:00. Максимальные значения градиента $0,0025 \text{ Км}^{-1}$ наблюдаются примерно с 01:00 до 12:00. Потенциальная температура на высоте 1000 м на Иссык-Куле изменяется в пределах нескольких градусов и принимает минимальные значения немного меньше $8 \text{ }^\circ\text{C}$ с 07:00 до 09:00 и максимальные примерно $13 \text{ }^\circ\text{C}$ с 15:00 до 18:00. В соответствии с этими данными частота Вьяйсяля–Брента на высоте 1000 м на Иссык-Куле принимала значения менее $0,006 \text{ Гц}$ во второй половине дня и достигала максимальных значений $0,009 \text{ Гц}$ в первой половине суток.

На Байкале вертикальный градиент потенциальной температуры в верхнем слое измерений изменяется в течение суток примерно от $-0,0012$ до $0,0012 \text{ Км}^{-1}$. Положительные значения градиента принимает в первой половине суток, достигая максимума в 05:00. Во второй половине суток градиент становится отрицательным, принимая минимальное значение в 16:00. Потенциальная температура на высоте

1000 м (1200 м над водной поверхностью) на Байкале остается постоянной, равной примерно $21 \text{ }^\circ\text{C}$, в течение ночного и утреннего времени с 21:00 до 11:00. Начиная с 11:00 она возрастает до максимума $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$ с 17:00 до 18:00, а затем убывает до $21 \text{ }^\circ\text{C}$ в 21:00. Из этих данных следует, что частота Вьяйсяля–Брента на высоте 1000 м на Байкале (1200 м над водной поверхностью) изменялась в течение суток по абсолютной величине от 0 до примерно $0,006 \text{ Гц}$.

Измерения температуры и скорости ветра с помощью акустических метеостанций в приземном слое атмосферы осуществлялись лишь во время наблюдений на Иссык-Куле и на Байкале. С использованием полученных с частотой 80 Гц данных на высоте 4 м во время измерений на Иссык-Куле и на высоте 10 м во время измерений на Байкале были рассчитаны средние значения и флуктуации температуры и компонент вектора скорости ветра, а затем по формулам (3) и (4) – скорость трения и масштаб Монина–Обухова. Это позволило рассчитать по формуле (1)

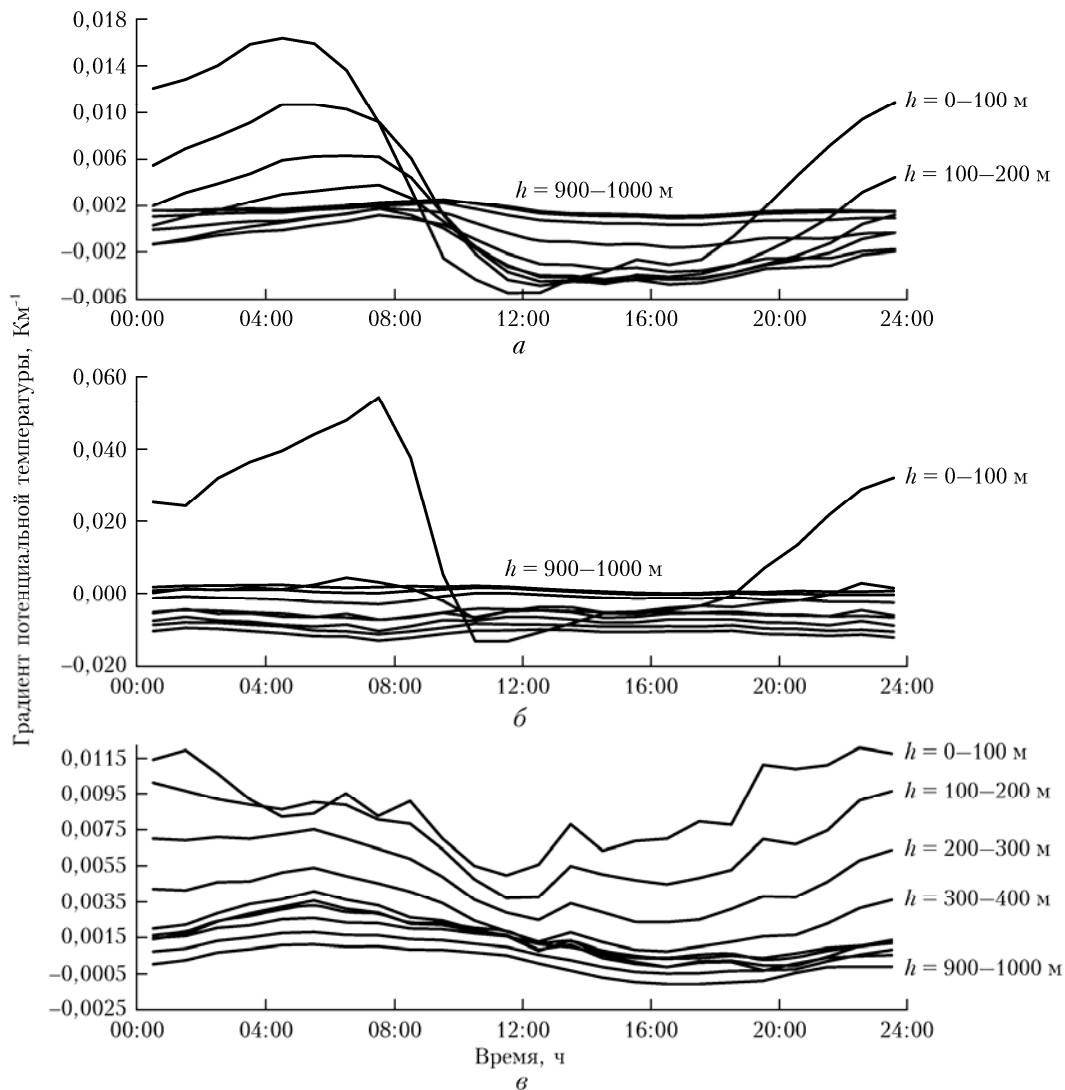


Рис. 7. Суточный ход среднего за час вертикального градиента потенциальной температуры, усредненный за время измерений: на территории ИОА СО РАН в Томске (а), на побережьях озер Иссык-Куль (б) и Байкал (в)

высоту пограничного слоя для ночного времени суток, когда в соответствии с данными, представленными на рис. 4, реализовывалась либо нейтральная, либо устойчивая температурная стратификация. Результаты расчета высоты пограничного слоя представлены на рис. 8, 9.

Из рис. 8, 9 следует, что расчет по формуле (2) приводит к нереалистично завышенной оценке высоты пограничного слоя. Учет ограничивающих факторов стратификации – отрицательного турбулентного потока потенциальной температуры и частоты Вейселя–Брента над верхней границей пограничного слоя по формуле (1) [1–3] – дает для оценки высоты пограничного слоя существенно меньшие значения, намного более близкие к наблюдаемым в реальности высотам долгоживущего устойчивого пограничного слоя [1]. В среднем высота пограничного слоя ночью во время измерений на Иссык-Куле и Байкале изменялась в пределах примерно от 400 до 100 м.

Заключение

Выполненные с использованием температурного профилера-радиометра МТР-5 сравнительные исследования пространственно-временной изменчивости температуры в пограничном слое атмосферы в г. Томске и прибрежных зонах озер Байкал и Иссык-Куль показывают, что в летнее время термические режимы нижнего километрового атмосферного слоя при отсутствии близлежащих водоемов и в горной местности на побережье крупных водоемов различаются.

На окраине г. Томска при отсутствии близлежащих водоемов в летнее время наблюдается периодическая смена термической стратификации с устойчивой ночью на неустойчивую в дневные часы во всем нижнем 700-метровом слое атмосферы. С увеличением высоты над подстилающей поверхностью амплитуда суточных вариаций вертикального градиента температуры уменьшается, а значения градиента

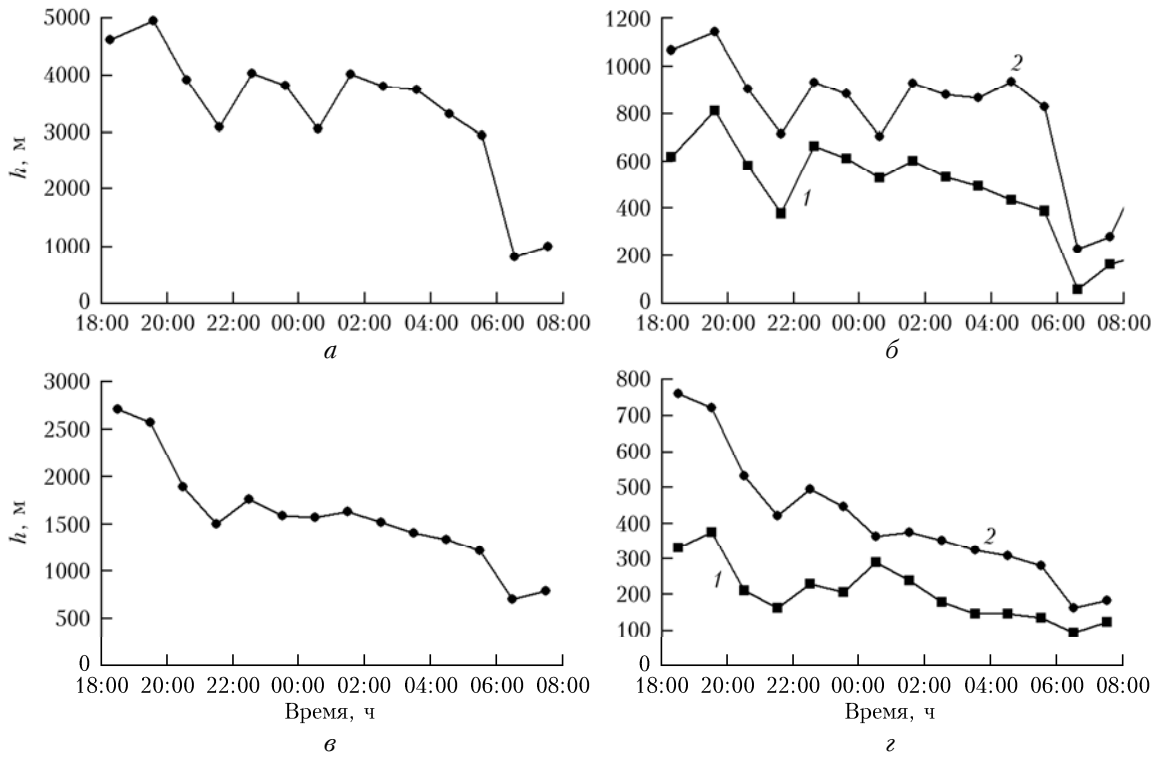


Рис. 8. Высота пограничного слоя во время измерений на Иссык-Куле: расчет по данным, полученным 23 и 24.09.2017 г. (*a*, *б*); результат усреднения оценок высоты за все время измерений 23–27.09.2017 г. (*в*, *г*); расчет по формуле (2) (*a*, *в*); расчет по формуле (1) с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) турбулентного потока потенциальной температуры (третьего слагаемого в квадратных скобках (1)) (*б*, *г*)

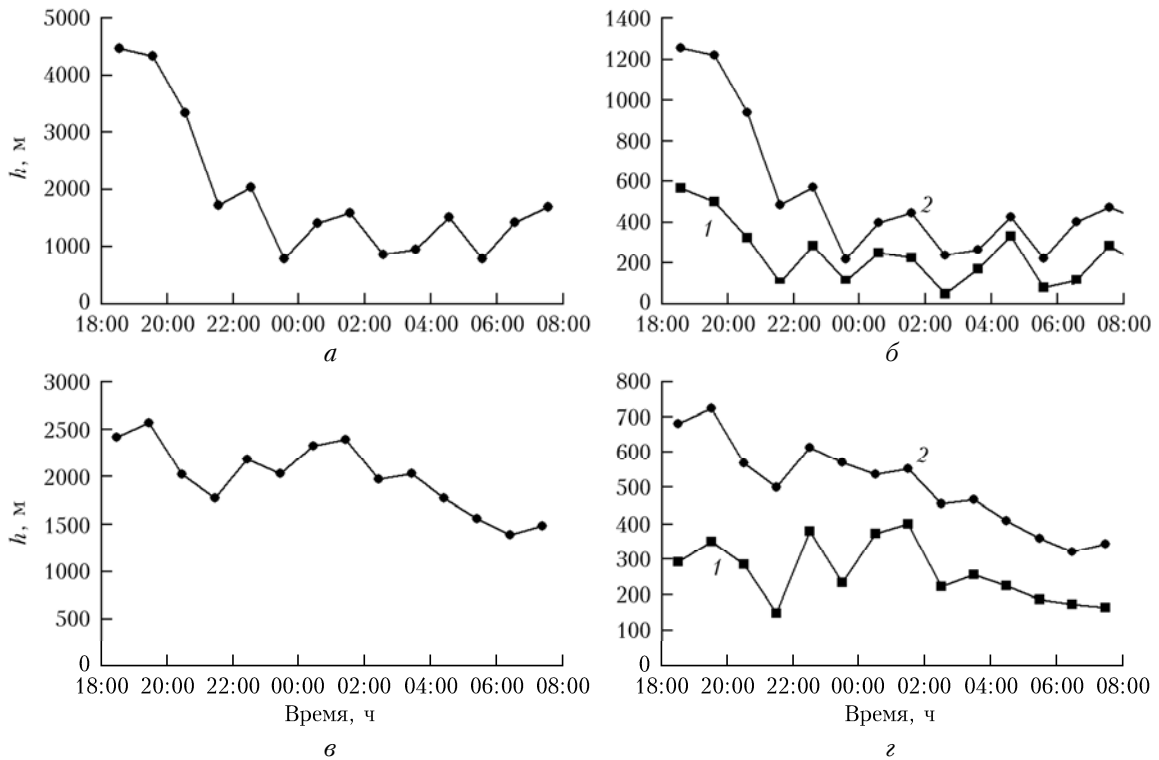


Рис. 9. Высота пограничного слоя во время измерений на Байкале: расчет по данным, полученным 2 и 3.08.2017 г. (*a*, *б*); результат усреднения оценок высоты за все время измерений 21.07–5.08.2017 г. (*в*, *г*); расчет по формуле (2) (*a*, *в*); расчет по формуле (1) с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) турбулентного потока потенциальной температуры (третьего слагаемого в квадратных скобках (1)) (*б*, *г*)

приближаются по величине к адиабатическому. На высотах 700–1000 м условия слабоустойчивой стратификации во время измерений в Томске выполнялись круглосуточно. В отличие от Томска суточная смена стратификаций во время измерений на Иссык-Куле происходила лишь в нижнем 200-метровом слое атмосферы. Выше 200 м на всех высотных уровнях измерений температурные градиенты остаются практически постоянными в течение суток. На высотах 200–700 м их значения соответствуют условиям неустойчивой температурной стратификации независимо от времени суток. Величины градиентов на этих высотах лежат в диапазоне значений от $-0,013$ до $-0,02$ Км^{-1} , что значительно превышает величины градиентов во время неустойчивой температурной стратификации в г. Томске. С дальнейшим увеличением высоты градиенты по величине становятся близкими к сухоадиабатическому и немного превышают его, т.е. на высотах 700–1000 м реализуются, как и в Томске, условия нейтральной и слабоустойчивой температурной стратификации независимо от времени суток.

На Байкале во время измерений в июле–августе 2017 г. практически всегда реализовывалась устойчивая термическая стратификация независимо от времени суток. Вертикальный градиент температуры на всех высотах измерения 700–1200 м над водной поверхностью озера мало изменяется в течение суток. Как и в Томске, вертикальный градиент температуры уменьшается с высотой и приближается по величине к адиабатическому. Однако условия, близкие к нейтральной стратификации с переходом к очень слабой неустойчивости, реализовывались в среднем за время измерений лишь на высотах 800–1000 м относительно высоты профилимера (1000–1200 м над водной поверхностью Байкала) примерно с 13:00 до 21:00, когда воздух на этих высотах прогревается и охлаждающее действие Байкала перестает сказываться.

Условия долгоживущего устойчивого по классификации С.С. Зилитинкевича пограничного слоя реализовались во время измерений на Байкале и Иссык-Куле в ночное время суток. В среднем, как показывают оценки с учетом ограничивающих параметров стратификации (отрицательного турбулентного потока потенциальной температуры над подстилающей поверхностью и частоты Вэйсяля–Брента над верхней границей пограничного слоя [1–3]), высота пограничного слоя ночью во время измерений на Иссык-Куле и Байкале изменялась в пределах приблизительно от 400 до 100 м.

Работа выполнена по проекту РНФ (проект № 14-17-00386-П).

1. Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М.: Физматлит, 2013. 252 с.
2. Zilitinkevich S., Esau I. Resistance and heat-transfer laws for stable and neutral planetary boundary layers:

Old theory advanced and re-evaluated // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2005. V. 131. P. 1863–1892.

3. Zilitinkevich S., Esau I., Baklanov A. Further comments on the equilibrium height of neutral and stable planetary boundary layers // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2007. V. 133. P. 265–271.
4. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Lenskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin A.S. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison experiments // J. Atmos. and Ocean. Technol. 1999. V. 16, N 7. P. 805–818.
5. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 697–704.
6. Кадыгров Е.Н., Ганшин Е.В., Миллер Е.А., Тоцилкина Т.А. Наземные микроволновые температурные профиломеры: потенциал и реальность // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 521–528; Kadygrov E.N., Ganshin E.V., Miller E.A., Tochilkina T.A. Ground-based microwave temperature profiles: Potential and experimental data // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 598–607.
7. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.
8. Миллер Е.А., Воробьева Е.А., Кадыгров Е.Н. Анализ межсезонных и межгодовых особенностей температурной стратификации городского острова тепла // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 552–557; Miller E.A., Vorob'eva E.A., Kadygrov E.N. Analysis of seasonal and annual peculiarities of the temperature stratification // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 4. P. 435–440.
9. Воробьева Е.А., Шапошников А.Н., Фоломеев В.В., Кадыгров Е.Н. Результаты измерений термической стратификации атмосферного пограничного слоя в каньонах и котловинах Гуамского хребта // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 505–509.
10. Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 877–883.
11. Эзау И.Н., Вольф Т., Миллер Е.А., Репина И.А., Троицкая Ю.И., Зилитинкевич С.С. Анализ результатов дистанционного мониторинга профиля температуры в нижних слоях атмосферы долины г. Берген (Норвегия) // Метеорол. и гидрол. 2013. Т. 38, № 10. С. 93–103.
12. Кадыгров Е.Н., Агапов Ю.В., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Тоцилкина Т.А., Троицкий А.В., Шапошников А.Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.
13. Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Куницын В.Е., Захаров В.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Ситанский С.И. Московский остров тепла в блокирующем антициклоне летом 2010 г. // Докл. АН. 2014. Т. 456, № 5. С. 591–595.

V.A. Banakh, A.V. Falits, A.A. Sukharev, N.P. Krasnenko, A.S. Rakov. Variations in the temperature regime of the atmospheric boundary layer in regions with different orography.

The spatiotemporal variability of temperature in the atmospheric boundary layer has been studied comparatively in the city of Tomsk (Russia) and in the coastal zones of Lake Baikal and Lake Issyk-Kul. Measurements with an MTP-5 temperature profiler have shown that the conditions of thermal stratification of the lower 1-km air layer strongly differ in summer under urban conditions in the absence of large water reservoirs nearby and in the mountain areas on the coasts of big lakes. The types of stratification and parameters of the atmospheric boundary layer in the regions under study are determined.