

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛООБМЕНА ПОВЕРХНОСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ПРИВОДНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА ДЛЯ ПЕРИОДА ОТКРЫТОЙ ВОДЫ

А.В. Пилипенко

Российский государственный гидрометеорологический университет,
pilipenko.an.12@gmail.com

Получены эмпирические зависимости между параметрами теплообмена поверхности Ладожского озера с атмосферой для различных лимнических районов Ладожского озера для процессов сезонного нагревания и охлаждения. Эти зависимости могут быть использованы при оценках испарения и турбулентного потока тепла в приводном слое воздуха. На основе средних многолетних данных получены уравнения изменения градиентов температуры и влажности в приводном слое воздуха для процессов нагревания и охлаждения для лимнических районов Ладожского озера. Полученные результаты могут быть использованы при количественных оценках неравномерности прихода тепла на акваторию озера при возможных климатических изменениях температуры поверхности воды Ладожского озера.

Ключевые слова: Ладожское озеро, температура поверхности воды, температура воздуха, влажность воздуха, давление насыщенного пара, теплообмен, гистерезис.

EMPIRICAL RELATIONS BETWEEN HEAT EXCHANGE PARAMETERS OF LAKE LADOGA SURFACE WITH AIR BOUNDARY LAYER FOR THE OPEN WATER PERIOD

A.V. Pilipenko

Russian State Hydrometeorological University

Empirical relations between the heat exchange parameters of Lake Ladoga surface and the atmosphere for various limnic regions of Lake Ladoga for the processes of seasonal heating and cooling are obtained. These relations can be used in estimating evaporation and turbulent heat fluxes in the air boundary layer. On the basis of the average long-term data, the equations of temperature gradients and humidity gradients in the air boundary layer for the heating and cooling process for the limnic areas of Lake Ladoga are obtained. The results obtained can be used for quantitative estimates of the irregularity of the arrival of heat in the lake's water area with possible climatic changes in the surface temperature of the water of Lake Ladoga.

Keywords: Lake Ladoga, water surface temperature, air temperature, air humidity, vapour pressure, heat exchange, hysteresis.

Введение

Ладожское озеро оказывает значительное влияние на окружающие его районы суши и создает особые условия взаимодействия поверхности воды и приводного слоя воздуха над акваторией. Процессы внешнего теплообмена определяют пространственно-временную структуру теплового баланса поверхности и всей

водной толщии озера [1]. В самом озере происходит взаимодействие гидрологических, физических, химических, биологических, геоморфологических и геологических процессов.

Для рассмотрения особенностей процессов обмена теплом необходимо знать закономерности распределения гидрометеорологических элементов в приводном слое. В зависимости от термической стратификации, от трансформации воздушного потока при определенных условиях во времени и пространстве процессы обмена могут быть направлены от водной поверхности или к ней и протекать с различной интенсивностью. Направление процессов теплообмена определяется градиентами температуры (ΔT) и влажности (Δe) в приводном слое. Как известно, турбулентный теплообмен с воздухом (P) в значительной степени зависит от разности температуры воды и температуры воздуха ($\Delta T = T_w - T_a$), а затраты тепла на испарение (LE) зависят от разности значений давления насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды и давления водяного пара в приводном слое ($\Delta e = e_w - e_a$). Безусловно, на потоках тепла существенно сказывается ветровое воздействие, однако оно не приводит к изменению их направленности — к поверхности озера или от нее, поэтому в данной работе рассматриваются параметры, ответственные за знак потоков тепла, и не учитывается изменчивость ветра [2].

Оценки потоков тепла (P и LE) для различных периодов, выполненные А.Ф. Изотовой в 1960—1970-х годах, показывают, что потоки тепла прямо пропорциональны скорости ветра и их значения для районов Ладоги со слабыми ветрами (восточный, западный, шхерный) составляют: LE в мае 2,25; 1,10 и 1,30 ккал/(см²·мес) соответственно; в ноябре 1,23; 1,38 и 1,24 ккал/(см²·мес) соответственно; P в мае -0,26; -1,11, и -1,04 ккал/см²·мес соответственно, в ноябре 0,45; 0,51 и 1,06 ккал/(см²·мес) соответственно; для центрального южного и центрального северного районов, которые отличаются сильными ветрами: LE в мае -1,27 и -0,17 ккал/(см²·мес) соответственно, в ноябре 3,31 и 3,04 ккал/(см²·мес) соответственно; P в мае -0,65 и -0,54 ккал/(см²·мес) соответственно, в ноябре 2,96 и 2,63 ккал/(см²·мес) соответственно [3].

Целью настоящего исследования является установление эмпирических зависимостей между существенными параметрами теплообмена поверхности озера с атмосферой: температурой воздуха и температурой воды, а также давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды и давлением водяного пара в воздухе в зависимости от распределения глубины озера. Эти зависимости затем могут быть использованы при оценках испарения с поверхности озера и турбулентного теплообмена между водной поверхностью и атмосферой.

Как известно, Ладожское озеро — крупнейшее озеро Европы: его площадь составляет 18 329 км², из которых 457 км² приходится на острова. Объем водной массы озера равен 848 км³, длина береговой линии без учета длины береговой линии островов — 1570 км. Начало ледовых явлений на Ладоге приходится на конец ноября, а таяние ледяного покрова в среднем приходится на период с начала до середины мая [4]. Озеро — димиктическое, полностью стратифицировано с момента исчезновения термобара в конце июня до возникновения осеннего термобара в ноябре [6].

Материалы и методы исследования

База данных, созданная в Институте озероведения РАН и послужившая основой для дальнейшего изучения теплового состояния воды и приводного слоя воздуха озера, включает в себя данные более 300 000 измерений гидрометеорологических параметров за период с 1897 по 2012 г. (рис. 1 *а*). Измерения проводились ежегодно за указанный период в каждой точке на высоте 2 м над поверхностью воды. На карте (см. рис. 1 *а*) хорошо видны стандартные разрезы и районы наиболее интенсивных измерений.

В настоящей работе в качестве исходных данных использовались значения температуры поверхности воды и приводного воздуха, а также значения абсолютной влажности воздуха за период открытой воды.

Лимническое районирование Ладожского озера было проведено в зависимости от распределения глубины, и все дальнейшие расчеты выполнены на его основе. Озеро было разбито на шесть районов (рис. 1 *б*): мелководный (глубина 0—18 м), переходный (18—50 м), район озерного уступа (50—70 м), склоновый (70—100 м), глубоководный (100—140 м) и район впадин (более 140 м) [6].

На рис. 2 показано распределение числа измерений всех исследуемых параметров в зависимости от месяца. Из рисунка видно, что наиболее благоприятные месяцы для измерений летние (июнь, июль, август) — здесь количество данных больше почти в два раза, чем в октябре и ноябре (минимальное число измерений

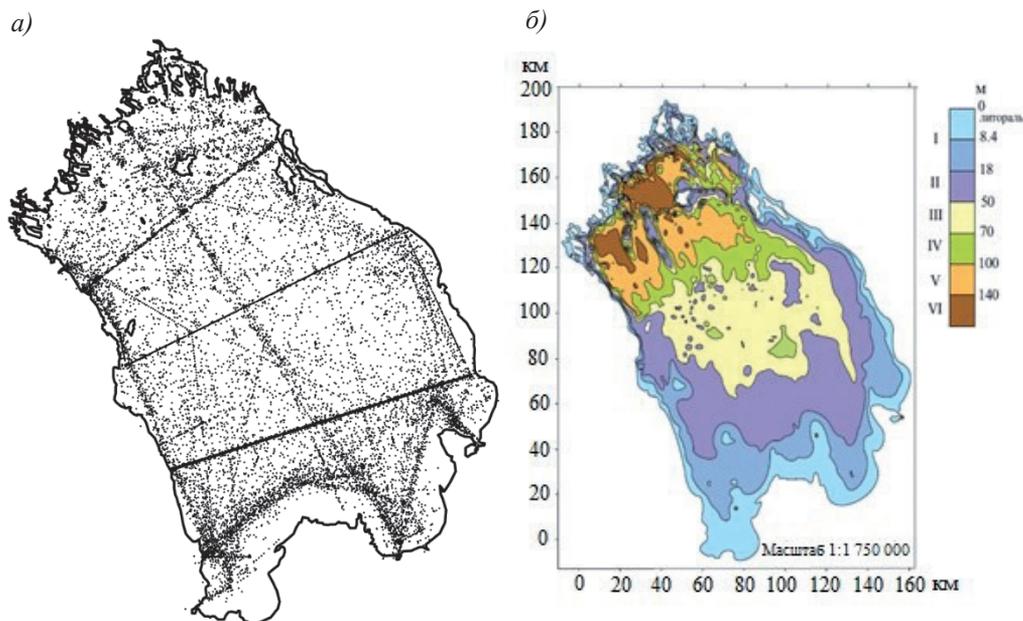


Рис. 1. Характеристики Ладожского озера [4].

а — распределение станций наблюдений по акватории Ладожского озера,
б — лимническое районирование Ладожского озера.

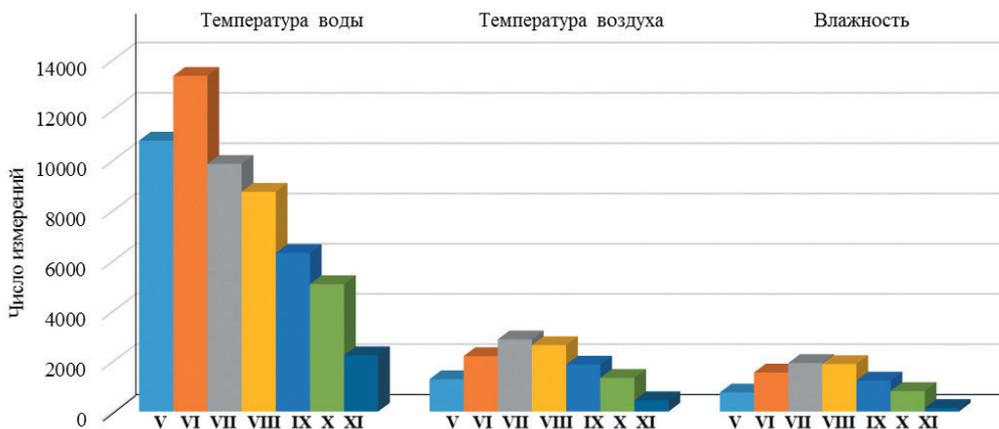


Рис. 2. Распределение числа наблюдений по всем исследуемым параметрам в зависимости от месяца для периода май — ноябрь.

2 тыс.). Самый большой объем данных собран по температуре воды (14 тыс. измерений), количество данных о температуре воздуха и влажности различается незначительно.

Расчет среднего многолетнего сезонного хода указанных характеристик был выполнен для каждого из выделенных районов Ладожского озера по всем данным вне зависимости от года наблюдений за период открытой воды (с 5 мая по 25 ноября) с целью изучения статистически обоснованных изменений пространственных термических структур озера. Осреднение проводилось для синоптического периода (10 суток) с перекрытием 5 суток, что позволило сгладить пространственно-временные вариации в каждом районе [8].

Отсутствие количественных оценок параметров теплообмена LE и P сдерживает работы по моделированию термогидродинамических процессов, происходящих в Ладожском озере.

Обсуждение результатов

На рис. 3 и 4 представлены зависимости между значениями температуры поверхности воды и воздуха и значениями давления насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды и давления водяного пара в приводном слое. Зависимости построены по среднедекадным данным за период с 5 мая по 25 ноября для каждого из шести лимнических районов Ладожского озера для периода весеннего нагревания (май — начало августа) и осеннего охлаждения (август — конец ноября).

Процесс нагревания отличается от процесса охлаждения, и степень этих отличий зависит от района озера, т.е. определяется распределением глубины. Очевидно (рис. 3), что в Ладожском озере существует температурный гистерезис для каждой из шести лимнических зон.

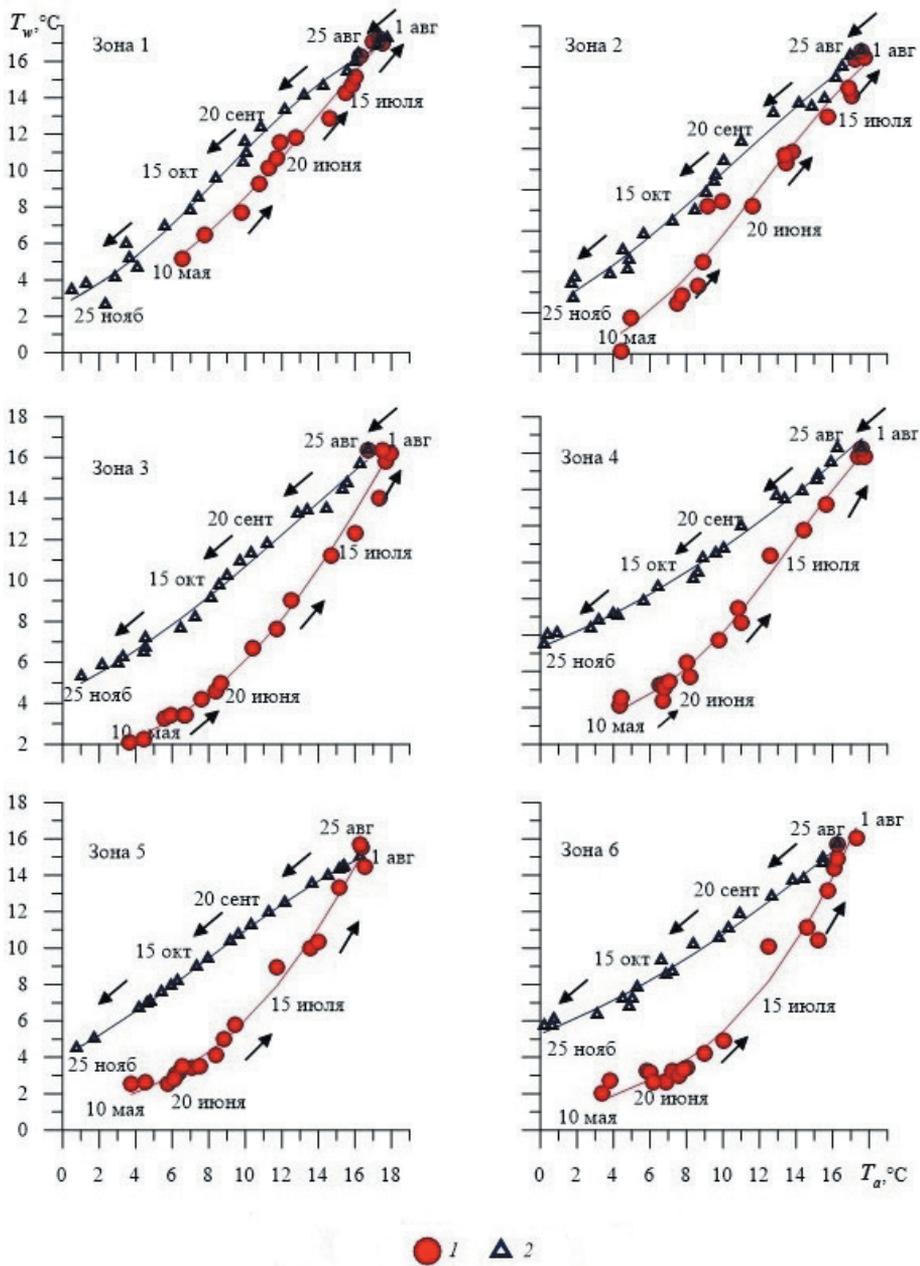


Рис. 3. Гистерезис связи между температурой воды (T_w) и температурой воздуха (T_a) для шести лимнических зон Ладожского озера, полученный на основе средних многолетних данных.

1 — процесс нагревания, 2 — процесс охлаждения.

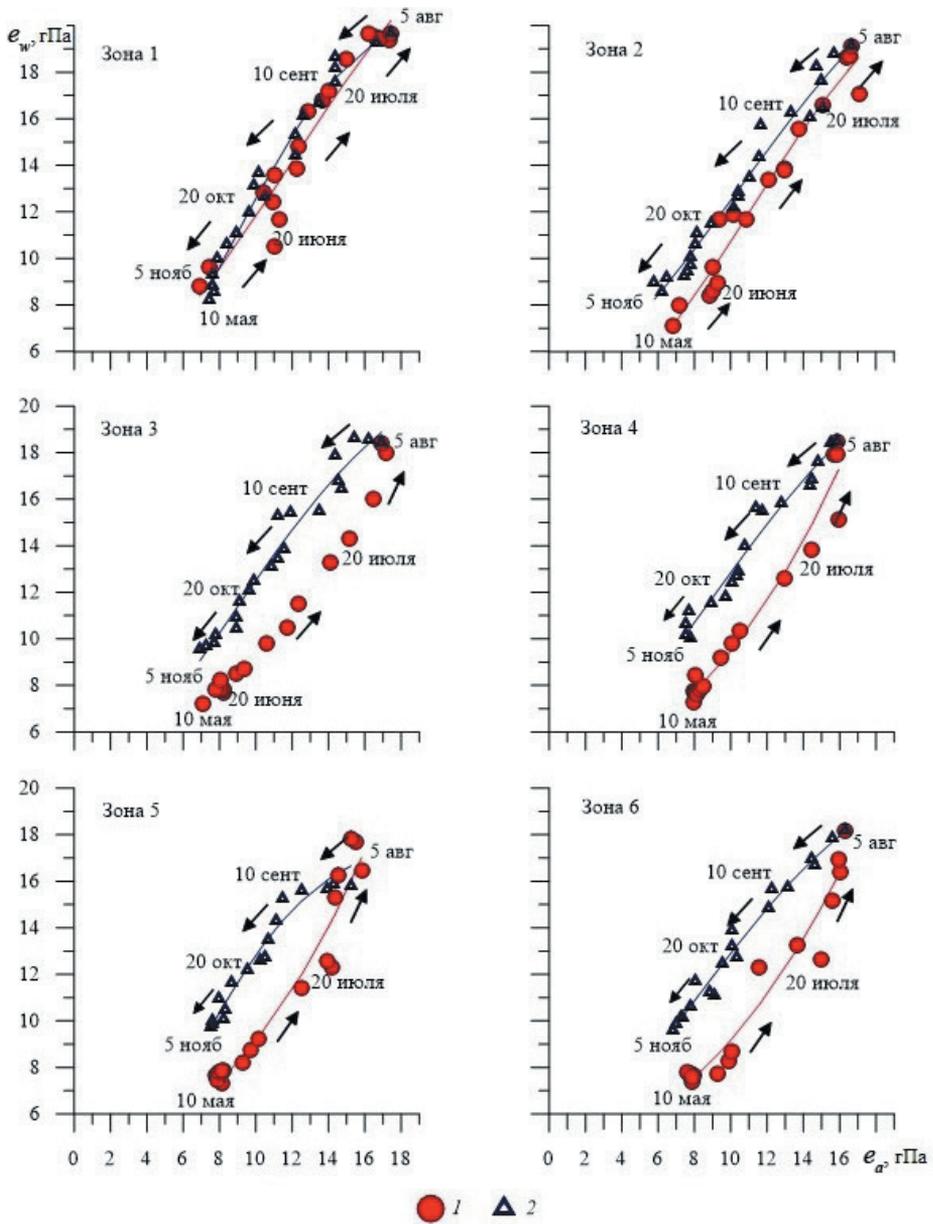


Рис. 4. Гистерезис связи между давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды (e_w) и давлением водяного пара в приводном слое (e_a) для шести лимнических зон Ладожского озера, полученный на основе средних многолетних данных.

1 — процесс нагревания, 2 — процесс охлаждения.

В различных частях озера нагревание и охлаждение водной толщи протекают по-разному в зависимости от распределения глубины. В связи с этим и форма кривых получается разная. Наиболее ярко выражены эти различия между мелководной (зона 1) и глубоководной (зона 5) зонами. Для зоны 5 (глубоководной) и зоны 6 (района впадин) наблюдается сходство временного хода температуры воздуха и температуры воды, так как речь идет о глубине более 100 м и, соответственно, процесс нагревания происходит в этих зонах медленнее, чем в мелководной, и охлаждается мелководная зона достаточно равномерно и значительно быстрее, чем глубоководная. Можно заметить, что с переходом от зоны к зоне увеличивается расхождение между линией нагревания и линией охлаждения. Это свидетельствует о том, что различие между скоростью нагревания и скоростью охлаждения зависит от глубины зоны, и, чем глубже, тем больше эти различия.

Гистерезис влажности для каждой из шести лимнических зон Ладожского озера представлен на рис. 4. Полученные результаты свидетельствуют о неравномерности прихода тепла на акваторию Ладоги за счет затрат тепла на испарение LE в зависимости от распределения глубины; это подтверждает и разная форма кривых. Наиболее ярко выраженные различия наблюдаются между мелководной (зона 1) и глубоководной (зона 5) зонами. Таким образом, результаты совпадают с выводами, полученными относительно температурного гистерезиса. В мелководной зоне (зона 1) скорости нагревания и охлаждения совпадают, в переходной зоне (зона 2) отмечается незначительное расхождение, и далее, с увеличением глубины, расхождение в скоростях становится все более заметным.

Следует отметить, что в 1970-х годах Т.Б. Форш-Меншуткиной и В.В. Меншуткиным [5] был экспериментально обнаружен кислородный гистерезис в олиготрофных озерах и дано его математическое описание. Были получены теоретические кривые кислородного гистерезиса, рассчитанные по уравнениям, похожим на используемые в данном исследовании, что указывает на подобие температурного и кислородного гистерезиса в озерах.

Для выполнения дальнейших исследований полученная зависимость между температурой воды и температурой воздуха была аппроксимирована уравнением, опубликованным в отчете по исследованию Канадских озер [9]:

$$T_w = \frac{a}{1 + e^{y(b-T_a)}}, \quad (1)$$

где T_w — температура воды; a , b , y — эмпирические коэффициенты; T_a — температура воздуха.

Аналогичная форма уравнения была использована для количественной оценки зависимости между давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды (e_w) и давлением водяного пара в приводном слое (e_a).

На основе средних многолетних данных и результатов проведенных расчетов (см. уравнение (1)) были получены уравнения, описывающие процессы нагревания и охлаждения, для всех шести лимнических зон Ладожского озера для

градиентов температуры и влажности. В табл. 1 и 2 приводятся эмпирические коэффициенты, входящие в полученные уравнения.

Для сравнения результатов были вычислены статистические характеристики (см. табл. 1 и 2): число данных (n), коэффициент детерминации (R^2), среднеквадратическое отклонение (СКО). Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что зависимости (см. рис. 3 и 4) могут быть использованы для дальнейших расчетов.

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты, входящие в уравнения вида (1) зависимости между температурой воды и температурой воздуха, и статистические характеристики, полученные по этим уравнениям, для всех лимнических зон Ладожского озера

Зона	Нагревание						Охлаждение					
	Коэффициент			n	R^2	СКО, °C	Коэффициент			n	R^2	СКО, °C
	a	b	y				a	b	y			
1	26,82	14,29	0,18	18	0,99	3,54	19,49	8,68	0,21	23	0,98	5,91
2	20,69	12,23	0,23	18	0,99	4,12	22,61	10,57	0,14	23	0,98	5,91
3	33,29	18,18	0,18	18	0,97	4,61	26,44	13,26	0,12	23	0,98	5,29
4	21,91	13,74	0,25	18	0,97	4,99	41,18	21,89	0,09	23	0,99	5,16
5	39,05	18,71	0,20	18	0,96	4,61	18,81	0,16	7,94	23	0,98	5,54
6	58,95	22,31	0,19	18	0,95	4,24	38,04	20,44	0,09	23	0,98	4,89

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты, входящие в уравнения вида (1) зависимости между давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды и давлением водяного пара в приводном слое, и статистические характеристики, полученные по этим уравнениям, для всех лимнических зон Ладожского озера

Зона	Нагревание						Охлаждение					
	Коэффициент			n	R^2	СКО, гПа	Коэффициент			n	R^2	СКО, гПа
	a	b	y				a	b	y			
1	27,96	11,85	0,17	18	0,93	3,20	21,55	8,78	0,28	20	0,96	3,17
2	24,22	11,13	0,20	18	0,96	3,41	25,91	10,44	0,16	22	0,97	3,34
3	475,87	51,85	0,09	16	0,97	3,62	22,81	9,02	0,20	21	0,96	3,09
4	296,06	42,20	0,11	16	0,95	3,38	23,93	9,17	0,18	18	0,96	2,85
5	625,01	48,73	0,11	16	0,93	3,10	18,11	7,03	0,30	20	0,94	2,89
6	424,62	48,27	0,10	18	0,92	3,54	22,15	8,21	0,19	16	0,96	2,55

Полученные результаты могут быть использованы при количественных оценках неравномерности прихода тепла на акваторию озера при возможных климатических изменениях температуры поверхности воды Ладожского озера [7]. Они подтверждают пространственно-временную неоднородность распределения параметров теплообмена в зависимости от лимнического районирования Ладожского озера.

Выводы

Установлены эмпирические зависимости параметров теплообмена, которые связывают температуру воды с температурой воздуха и давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды с давлением водяного пара в приводном слое.

Эти зависимости могут быть использованы при оценках испарения и турбулентных потоков тепла в приводном слое воздуха. На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что распределение составляющих теплового баланса по акватории Ладожского озера — затрат тепла на испарение и турбулентного потока тепла — существенно зависит от распределения глубины воды в озере.

Представленные зависимости позволяют также исходя из предполагаемых климатических изменений и задавая значения температуры воздуха давать оценку изменениям температуры поверхности Ладожского озера. Кроме того, они могут быть использованы в качестве граничных условий в моделях термогидродинамических процессов, происходящих в Ладожском озере [7].

Список литературы

1. *Догановский А. М., Малинин В. Н.* Гидросфера Земли. СПб: Гидрометеоздат, 2004. 629 с.
2. *Изотова А. Ф.* Турбулентный тепло- и влагообмен больших озер. Л.: Наука, 1982. 144 с.
3. *Изотова А. Ф.* Турбулентный теплообмен и затраты тепла на испарение с поверхности Ладожского озера // Тепловой режим Ладожского озера // Труды лаборатории озероведения. 1968. Т. XXII. С. 100—143.
4. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Под ред. В.А. Румянцева. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
5. *Фори-Менишуткина Т.Б.* Кислородный гистерезис в олиготрофных озерах / В кн.: Вопросы современной лимнологии. Под ред. С.В. Калесника. Л.: Наука, 1973. 240 с.
6. *Науменко М.А.* Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Известия РАН. Серия геогр. 2013. № 1. С. 62—72.
7. *Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г.* О климатических трендах температуры поверхности воды Ладожского озера в безледный период // Доклады РАН. 2006. Т. 408, № 5. С. 675—678.
8. *Науменко М.А., Каретников С.Г.* Морфометрия и особенности гидрологического режима Ладожского озера / В кн.: Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. С. 16—49.
9. *Schertzer W.M., Taylor B.* Report to the Okanagan Water Supply and Demand Study on Lake Evaporation Assessment of the Capability to Compute Evaporation from Okanagan Lake, Other Mainstem Lakes and Basin Lakes and Reservoirs using the Existing Database // WSTD Contribution. 2009. No. 08-547. 102 p.