

В.Н.Большаков, к.г.н.

Одесский филиал института биологии южных морей

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МЕЛКОВОДНОГО ВОДОЕМА (НА ПРИМЕРЕ ДОФИНОВСКОГО ЛИМАНА) ПО СРАВНЕНИЮ С ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИЕЙ МОРЯ

На основании годовых серий измерений с получасовой дискретностью выявлены тонкие различия изменчивости температуры воды разных временных масштабов в море у побережья Одессы и в мелководном Дофиновском лимане. При практически одинаковых потоках солнечной радиации -- главного фактора изменчивости температуры -- эти различия определяются морфометрией водоемов, которая трансформирует результаты действия метеорологических факторов, включая ту же солнечную радиацию. Выявлены две интересные особенности изменчивости температуры воды подо льдом.

Ключевые слова: Дофиновский лиман, температура воды, получасовая дискретность, временная изменчивость, временные масштабы, годовой ход, суточный ход, лед.

Вступление. Длительные измерения температуры воды у побережья Одессы с повышенной, а именно: с получасовой, дискретностью позволили выявить интересные и тонкие детали изменчивости суточного и меньших временных масштабов, а также уточнить некоторые параметры изменчивости в масштабах более суток [1]. Океанологические условия и проявления метеорологических воздействий в точке измерения у открытого морского побережья сильно отличаются от таковых в крайне мелководном и лишенном связи в морем водоеме. Эти различия неизбежно должны проявиться в различиях температурного режима

Цель предлагаемой работы сравнить изменчивость температуры на акватории, где изменчивость, вследствие однородности водной массы, определяется почти исключительно солнечной радиацией, с изменчивостью на акватории, где велика роль термической стратификации и к солнечной радиации добавляются динамические причины.

Первую акваторию представляет Дофиновский (Большой Аджалыкский) лиман, который при среднем уровне имеет объем всего 0,0045 км³, среднюю глубину 0,74, а максимальную – 1,2 м [1]. При такой морфометрии и отсутствии в 2011, 2012 гг. связи с морем, кроме разве что фильтрации через песчаную пересыпь, гидрофизические параметры водной массы лимана, как по горизонтали, так и по вертикали, в любое время года находятся в очень узких диапазонах.

В море, даже на таких же малых глубинах у берега, изменчивость температуры в точке значительно больше вследствие смены водных масс и особенно вследствие миграции термоклина под воздействием ветра и других динамических причин.

Объектом исследования служат, главным образом, периодические, годовые и суточные, колебания температуры воды и их тонкие различия в акваториях указанных типов. Новизну исследованиям придают высококачественные годовые серии наблюдений с частотой 48 измерений в сутки с помощью термографа HOBO Water Temp Pro [2].

Методы исследования. Годовой ход температуры воды аппроксимируется по среднесуточным значениям гармоническими функциями. Наилучшее сочетание параметров функций, среднего значения, амплитуды и фазы, определялись по критерию минимизации суммы произведений квадратов отклонений фактического ряда от аппроксимирующей функции.

Численные эксперименты, моделирующие суточные изменения температуры суммой гармонической и линейной функций, показали, что их разделение традиционным путем, т.е. путем вычитания из ряда дискретных наблюдений за сутки среднесуточного значения приводит к уменьшению амплитуды и фиктивным экстремумам. Поэтому в данной работе выделению суточных колебаний температуры предшествовало скользящее осреднение исходного ряда с суточным периодом. В результате выявлялся низкочастотный тренд, вычитание которого из исходного ряда преобразовывало его в ряд суточных аномалий. Этот ряд и подвергался дальнейшему анализу.

Результаты и анализ. Что касается годового хода температуры воды, то естественно ожидать его запаздывания по отношению к астрономическому режиму притока солнечной радиации, причем, в силу несоизмеримого различия в объемах водных масс, в море это запаздывание должно быть больше, чем в лимане. Определить величину запаздывания непосредственно по среднесуточным значениям из-за их сильного разброса невозможно (рис.1). Однако это легко сделать по аппроксимирующей функции.

И действительно, в Дофиновском лимане минимум обобщенного аппроксимацией годового хода температуры воды зимой 2011/12 гг. пришелся на 15 и 16 января 2012 г. и составил $-0,67^{\circ}\text{C}$. Запаздывание по отношению к 22 декабря, когда суточный притока солнечной радиации минимален, составило 24-25 дней.

В море (яхт-клуб «Отрада») минимум обобщенного годового хода температуры воды зимой 2008/09 гг. пришелся на 1-3 февраля 2009 г. Запаздывание составило 41-43 дня, а следующей зимой 2009/10 гг. – 40-42 дня.

Максимум обобщенного годового хода температуры воды в Дофиновском лимане летом 2012 г. пришелся на 13 июля 2012 г. т.е. на 21-й день после дня летнего солнцестояния, а аналогичные максимумы температуры воды в море (яхт-клуб «Отрада») летом 2008 и 2009 гг. пришлись на 42-43-й дни.

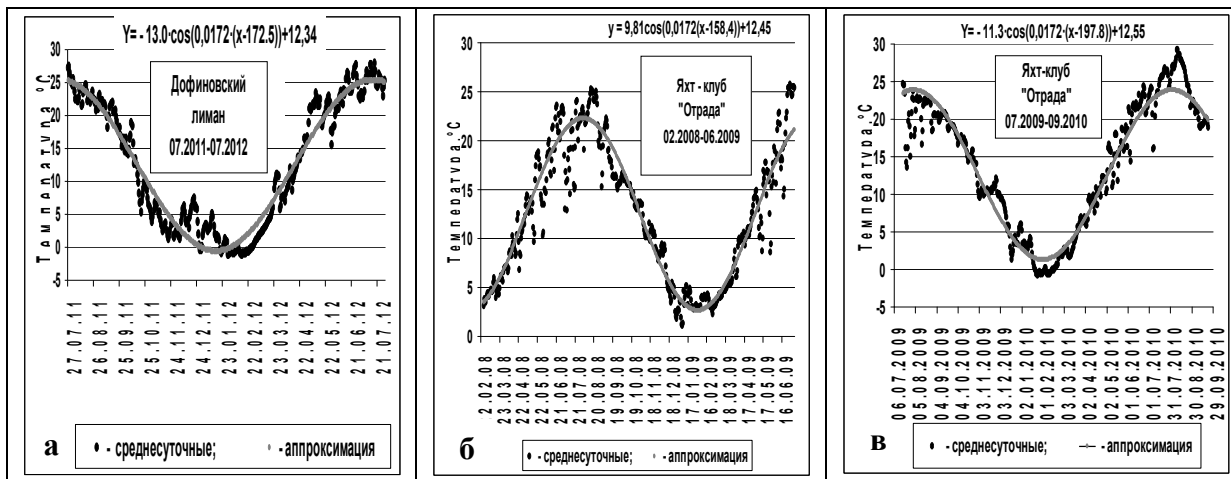


Рис.1 – Средние суточные температуры воды и их аппроксимация гармонической функцией: а - Дофиновский лиман (июль 2011 – июль 2012 гг.); б - яхт-клуб «Отрада» (февраль 2008 – июнь 2009 гг.); в - яхт-клуб «Отрада» (июль 2009 – сентябрь 2010 гг.)

Полученные таким образом несколько значений фазовых соотношений изменчивости потоков солнечной радиации и изменений температуры воды позволяют предположить, что:

а) весенний прогрев воды как в мелководном водоеме, так и в прибрежной зоне моря начинается примерно в одно и то же время уже на четвертой неделе после зимнего минимума притока солнечной радиации и

б) реакция как мелководного водоема, так прибрежной зоны моря на уменьшение потоков солнечной энергии проявляется заметно медленнее: осеннее охлаждение начинается только на шестой-седьмой неделе после дня летнего солнцестояния. Эта задержка возможно и служит основанием для такого понятия как «бархатный сезон».

Отмеченная асимметрия между весенним прогревом и осенним охлаждением, с гидрологической точки зрения, легко объяснима. Весной, начавший формироваться термоклин запирает зимний запас холода в глубине, и солнечная энергия, концентрируясь в приповерхностном слое, быстро его нагревает. Осенью, напротив, вертикальные конвекционные движения поддерживают однородность гораздо большую толщу воды, вовлекая в остывающий верхний слой летние запасы тепла из глубины.

Кроме запаздывания можно также предположить, что малый и изолированный от моря объем воды в Дофиновском лимане острее реагирует как на зимнее охлаждение, так и на летний прогрев, чем акватория яхт-клуба «Отрада», имеющая значительно меньшую площадь, но зато значительно большие глубины и достаточно свободно сообщаемая с морем. Здесь имеется в виду, что зимой вода в лимане охлаждается до более низких температур, а летом прогревается до более высоких.

Действительно, по обобщенной характеристике годового хода температура воды в лимане в 2012 г. менялась от $-0,67^{\circ}\text{C}$ зимой до $25,36^{\circ}\text{C}$ летом; размах колебаний больше 26°C .

Аналогичные характеристики в море, полученные за два года, сильно отличаются не только от лиманных, но и заметно различаются между собой. Поэтому есть смысл привести их не усредняя. В очень обычном во многих отношениях 2009 году это: $2,64^{\circ}\text{C}$ зимой, $22,26^{\circ}\text{C}$ летом; размах $19,62^{\circ}\text{C}$, а во многих отношениях аномальном 2010 году это: $1,26^{\circ}\text{C}$ зимой, $23,84^{\circ}\text{C}$ летом; размах $22,58^{\circ}\text{C}$.

Фактические экстремумы среднесуточной температуры могут существенно отличаться от приведенных экстремальных значений обобщенного годового хода характеризующих климатический режим. Так минимальная среднесуточная температура воды в Дофиновском лимане оказалась равной $-1,28^{\circ}\text{C}$ и отмечена почти на две недели позже климатического минимума (рис. 1а). На рис 1б обращает на себя внимание сильный разброс среднесуточных значений относительно климатического годового хода летом 2008 г. Тогда за 3,5 месяца было отмечено 20 эпизодов сгонно-нагонных явлений, включая сгон 4-5 июля с падением температуры на $13,7^{\circ}\text{C}$ [3]. В аномальном 2010 году зимой абсолютный минимум температуры воды оказался на 2°C ниже минимума по обобщенному годовому ходу (рис. 1в) и отрицательным, $-0,74^{\circ}\text{C}$, что объясняет почему море в зиму 2010 г. серьезно замерзло. На том же рисунке можно видеть еще большую аномалию, относящуюся к августу 2010 г., когда среднесуточная температура воды в течение 6 суток была выше 28°C , а 9 и 10 августа превышала 29°C .

Оценки параметров **суточного** хода температуры воды в море в придонном слое на глубине 2 м определены в [3]. В настоящей работе предполагается сравнить эти оценки с параметрами суточного хода в лимане также в придонном слое, но на глубине 1 м. Рабочая гипотеза заключается в том, что в лимане помех динамического характера, зашумляющих термические процессы, меньше, а потому суточный ход температуры воды в лимане должен проявляться чаще и лучше.

Исходный ряд для исследования суточной изменчивости температуры воды в Дофиновском лимане вообще и суточного хода в частности представляет собой 364-

дневную серию наблюдений с получасовой дискретностью с 27 июля 2011 по 26 июля 2012 г.

Для исследования суточной изменчивости и особенно суточного хода температуры воды использовались ее аномалии, рассчитанные как отклонения фактических значений от скользящих среднесуточных.

Реперные значения характеристик суточной изменчивости для последующих сравнений получим просто усредняя экстремумы и время их наступления за каждые сутки (табл.1).

Таблица 1 - Средние за год наблюдений значения суточных экстремумов, моментов их наступления (**час:мин**) и суточных диапазонов изменчивости температуры воды (°С) в Дофиновском лимане

Дата	Средний минимум	Время минимума	Средний максимум	Время максимума	Средний диапазон
Июль 11-июль 12	-0,93	8:03	1,00	17:04	1,93

Посмотрим, как значения тех же параметров меняются в течение года по месяцам (табл. 2):

Таблица 2 - Средние месячные значения суточных экстремумов, моментов их наступления и суточных диапазонов изменчивости температуры воды

Месяц	Средний минимум	Время минимума	Средний максимум	Время максимума	Средний диапазон
Август 2011	-1.42	8:39	1.52	16:58	2.94
Сентябрь 2011	-1.34	8:53	1.30	17:54	2.64
Октябрь 2011	-1.25	8:41	1.16	18:13	2.41
Ноябрь 2011	-0.75	9:08	0.75	18:10	1.50
Декабрь 2011	-0.45	7:57	0.41	17:55	0.86
Январь 2012	-0.38	9:02	0.35	19:12	0.73
Февраль 2012	-0.08	8:47	0.08	11:16	0.16
Март 2012	-0.43	6:52	0.41	17:48	0.84
Апрель 2012	-0.96	7:48	1.14	16:30	2.10
Май 2012	-1.17	7:09	1.43	16:27	2.60
Июнь 2012	-1.39	6:54	1.78	16:18	3.17
Июль 2011+ Июль 2012	-1.02	8:31	1.17	17:41	2.19

*Примечание: неполные месяцы июля 2011 и 2012 гг.в начале и в конце наблюдений объединены

Очевидно, что диапазоны среднемесячной суточной изменчивости температуры в семи месяцах, с августа по октябрь и с апреля по июль, не просто превышают, а значительно больше, чем в пяти месяцах с ноября по январь. Среднемесячные диапазоны их суточной изменчивости, 2,10 – 3,17°С и 1,50 – 0,16°С, даже не соприкасаются. Первую, семимесячную, часть года назовем теплой, а вторую, пятимесячную – холодной. Средние значения суточных размахов температуры за теплый и холодный периоды, естественно, тоже значительно различаются: 2,65 и 0,82°С (табл.3). Обратим внимание на то, что даже на фоне низкой суточной изменчивости холодного периода резко выделяется февраль. Причина этого будет обсуждена ниже.

Необходимое условие возникновения таких различий заключается в том, что малая толща воды в лимане успевает в течение суток отреагировать на ночное отсутствие притока солнечной радиации и на ее дневной ход от нуля до максимума и обратно. А впечатляющая величина различий объясняется тем, что в теплый период солнце в полдень на широте Одессы поднимается над горизонтом на 35-65°, а в холодный период только на 20-35°. За счет этого суточные потоки на горизонтальную поверхность в теплый период всегда больше, чем в холодный, а во второй половине июня и второй половине декабря различия достигают пяти раз.

Таблица 3 - Средние значения суточных экстремумов, моментов их наступления и суточных диапазонов изменчивости температуры воды за теплый и холодный периоды

Периоды	Месяцы	Средний минимум	Время минимума	Средний максимум	Время максимума	Средний диапазон
Теплый	апрель– октябрь	-1.33	7:57	1.32	17:23	2.65
Холодный	ноябрь – март	-0.42	8:21	0.40	16:52	0.82

Как и следовало ожидать, в теплый период, вследствие более продолжительного времени нахождения солнца над горизонтом, суточные минимумы, в среднем, наступают раньше, а максимумы позже, чем в холодный период (табл.3).

Таблицы 1-3 характеризуют суточную изменчивость температуры воды независимо от вызывающих ее причин. Выделим теперь из общей суточной изменчивости температуры суточный ход, под которым понимаются закономерные изменения температуры воды, выраженные в дневном прогреве и ночном выхолаживании. Для этого следует отделить дни, в которые суточная изменчивость температуры с большой степенью вероятности связана с суточным ходом солнечной радиации, от дней, когда она определялась другими причинами. С этой целью из дальнейшего рассмотрения были исключены дни, в которые суточная изменчивость температуры не отвечала хотя бы одному из двух мягких и естественных критериев, а именно: суточный максимум должен предшествовать заходу солнца, и суточный минимум должен предшествовать этому суточному максимуму.

Вследствие отмеченной выше очень сильной зависимости потоков солнечной энергии от высоты солнца следует ожидать, что отсев дней с мощным сигналом от солнца будет меньше в теплый период, по сравнению с холодным, когда сигнал от солнца много слабее. И действительно, для оценок параметров суточного хода в теплый период оказались пригодными 78% дней, а в холодный только 59%.

Сравнение параметров теперь уже **суточного хода** (табл.4) с параметрами **общей суточной изменчивости** (табл.2) показывает, что во все месяцы, опять-таки кроме февраля, размах колебаний температуры в чисто суточном ходе больше, чем в его смеси с другими процессами. Это позволяет сделать вывод о том, что в мелководном лимане главной причиной изменчивости температуры служит периодичность потоков солнечной радиации как в суточном, так и в годовом масштабах.

В море [3] в 2008 г. для исследования суточного хода по тем же соображениям был отобран трехмесячный отрезок с самой большой суммой среднесуточных температур. Он пришелся на 21 июня – 19 сентября. Полуденная высота солнца в это время была максимальной и близкой к максимуму в диапазоне 65 – 55°. Поэтому в 83 сутках, отобранных по той же методике, суточный ход был хорошо выраженным, и все равно в море его средний размах (1,94°С) составил только 62% от среднего размаха

суточного хода (3,13°C) на Дофиновском лимане в те же календарные дни июня – сентября 2011 и 2012 гг.

Таблица 4 - Средние месячные параметры **суточного хода** температуры воды в Дофиновском лимане

Месяц	Средний минимум	Время минимума	Средний максимум	Время максимума	Средний диапазон
Август 2011	-1.61	8:35	1.80	18:04	3.41
Сентябрь 2011	-1.40	8:51	1.30	17:26	2.70
Октябрь 2011	-1.39	8:45	1.28	16:57	2.67
Ноябрь 2011	-0.83	8:34	0.85	16:47	1.68
Декабрь 2011	-0.60	8:08	0.51	16:30	1.11
Январь 2012	-0.45	8:42	0.42	17:09	0.87
Февраль 2012	-0.04	7:40	0.04	14:20	0.08
Март 2012	-0.60	7:00	0.53	15:51	1.13
Апрель 2012	-1.04	6:15	1.30	16:57	2.34
Май 2012	-1.28	6:13	1.54	16:02	2.82
Июнь 2012	-1.46	7:13	1.88	17:00	3.34
Июль 2011 + Июль 2012	-1.41	7:56	1.61	16:43	3.02

*Примечание: неполные месяцы июля 2011 и 2012 гг. в начале и в конце наблюдений объединены

Кроме того оказалось, что размах суточного хода температуры воды **в море** на 10% **меньше**, а **в лимане** на 4% **больше** размаха суммарной суточной изменчивости. Это косвенно подтверждает предположение о преобладающем вкладе в суточную изменчивость в лимане термических процессов над динамическими, а в море наоборот.

И, наконец, если сравнить усредненную по месяцам суммарную суточную изменчивости температуры воды в Дофиновском лимане (табл.2), то в феврале она минимальная, причем ближайшему по этому критерию январю февраль уступает в 4,5 раза. Если же сравнить за эти же месяцы диапазоны изменчивости обусловленные только суточным ходом (табл.4), то февральский меньше в 11 раз.

На рис. 2 приведен 10-недельный участок графика температуры воды полностью включающий февраль и март 2012 г.



Рис.2 – Суточная изменчивость температуры воды в Дофиновском лимане при переходе от зимы к весне 2012 г.

Дискретность значений на этом графике 3 часа, что вполне достаточно для отражения суточной изменчивости, но между 11 февраля и 19 марта он выглядит гораздо более гладким, чем графики среднесуточных значений температуры (рис. 1).

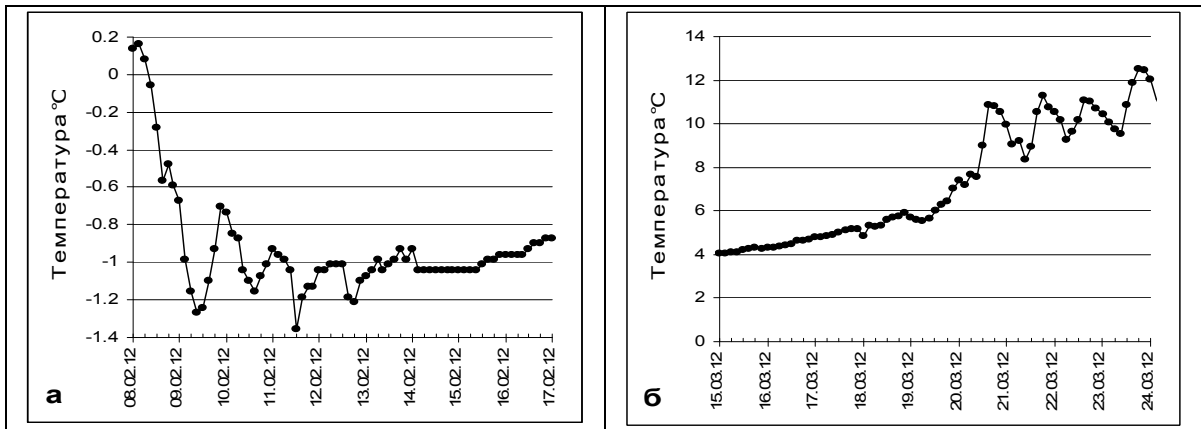


Рис.3 – Суточная изменчивость температуры воды в Дофиновском лимане в начале (а) и конце (б) ледостава в 2012 г.

На рис. 3 в увеличенном масштабе представлены начало этого интересного участка, где суточная изменчивость сходит на нет, и конец, где суточная изменчивость снова возрождается. Судя по датам, по февральской отрицательной аномалии температуры воздуха $-5,3^{\circ}\text{C}$ и по температуре воды (рис.3а) можно утверждать, что этот участок кривой своим существованием обязан льду. К сожалению, такой результат наблюдений оказался непредвиденным, и систематических наблюдений за ледовой обстановкой на лимане в ту зиму не велось. Единственное измерение толщины льда, любезно предоставленное нам аспирантом ОФ ИнБЮМ Е.В. Соколовым, было выполнено 12 февраля и дало 27 см. К этому моменту было накоплено 202,5 градусо-дней мороза, что составило 86% от их общего количества за ту зиму. Глава фермерского хозяйства «Восход» на Дофиновском лимане А.Т. Запороженченко назвал вторую декаду февраля как предположительное время схода льда, что весьма вероятно, если сравнить средние температуры воздуха в феврале по декадам: $-11,1^{\circ}\text{C}$, затем $-6,6^{\circ}\text{C}$ и в 3-й $+1,7^{\circ}\text{C}$.

Если до последних дней 2-й декады лиман был покрыт льдом, то на рисунках 2 и 3б обнаруживается еще один удивительный факт: оказывается температура воды у дна, на глубине 1 м, **подо льдом** в течение 40 дней выросла с -1 до $+6^{\circ}\text{C}$. Таким образом, можно предположить, что лед вследствие малой теплопроводности очень хорошо отфильтровывает высокочастотные суточные колебания и действует более эффективно, чем стекло в теплице, поддерживая разницу температур воздух – вода до 12°C не только днем, но и ночью

Выводы. Температурный режим водоемов зависит по меньшей мере от нескольких причин, действие каждой из которых преломляется через их, водоемов, морфометрические характеристики:

Запаздывание зимнего минимума температуры воды по отношению к минимуму суточного притока солнечной радиации, как в мелководном лимане, так и в прибрежной зоне моря, составляет 3-4 недели, а запаздывание летнего максимума температуры воды по отношению к максимуму суточного притока солнечной радиации составило для обеих акваторий 6-7 недель. При этом размах годового хода в лимане превышает 26°C , что на $3-5^{\circ}\text{C}$ больше, чем в море.

В мелководном водоеме изменчивость температуры воды определяется главным образом периодичностью потоков солнечной радиации как в годовом, так и в суточном масштабах. Все другие возможные причины изменчивости температуры вследствие высокой однородности водной массы проявляются слабее.

В прибрежной зоне моря, даже на таких же малых глубинах и при тех же потоках солнечной радиации, ведущая роль в изменчивости температуры воды переходит к динамическим факторам: миграции термоклина под воздействием ветра, горизонтальному переносу локальных неоднородностей, вертикальному перемешиванию.

Устойчивый ледяной покров на лимане подавляет суточную изменчивость температуры, но, по-видимому, не препятствует, а способствует прогреву воды под ним, причем до значений гораздо более высоких, чем температура таяния. Проверка последнего предположения требует морозной зимы и специального длительного осенне-зимне-весеннего эксперимента.

Литература

1. *Северо-западная часть* Черного моря: биология и экология. Под ред. Ю.П. Зайцева, Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничевой. –К: Наукова Думка.– 2006.–Раздел III.–Глава 1.–С. 351-427.
2. <http://www.onetemp.com.au/Data-Loggers/НОВО-U22-001-Water-Temp-Pro-v2,-Water-Temperature-Data-Logger-Underwater.aspx?cl=2&id=43&c=28>
3. *Большаков В.Н.* Изменчивость температуры воды у побережья Одессы в масштабах от года до получаса // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – №9. – С.220-227.

Особливості температурного режиму у мелководних водоймах (на прикладі Дофінівського лиману) у порівнянні з прибережною акваторією моря. Большаков В.Н.

На підставі річних серій вимірювань з півгодинною дискретністю виявлені тонкі відмінності мінливості температури води різних часових масштабів в морі біля узбережжя Одеси і в мелководному Дофінівському лимані. При практично однакових потоках сонячної радіації – головного чинника мінливості температури – ці відмінності визначаються морфометрією водойм, яка трансформує результати дії метеорологічних факторів, включаючи ту ж сонячну радіацію. Виявлено дві цікаві особливості мінливості температури води під льодом.

Ключові слова: Дофінівський лиман, температура води, півгодинна дискретність, часова мінливість, часові масштаби, річний хід, добовий хід, лід.

Features of temperature regime in shallow waters (the case of Dofinovsky estuary), compared with the sea coast of Odessa. Bolshakov V.N.

Subtle differences temperature variability of different time scales in the sea off the coast of Odessa and in the shallow Dofinovsky estuary are revealed on a base of annual series of measurements with a half-hour measuring resolution. When conditions of the solar radiation – the main factor of the temperature variability – are almost identical these differences are determined by morphometry of a bodies of water. Morphometry features of water transform the results of the meteorological factors, including the same solar radiation. Two interesting features of the variability in water temperature under the ice are revealed.

Keywords: Dofinovsky estuary, water temperature, the half-hour measuring resolution, time variability, time scales, annual cycle, diurnal cycle, ice.