

Д. И. МАСЛИЧ

ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИОННОГО ПОЛЯ ОБШИРНЫХ ВОДОЕМОВ НА ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В настоящее время при изучении влияния атмосферы на результаты геодезических измерений возникла необходимость расширить исследования закономерностей изменения поля градиентов температу-

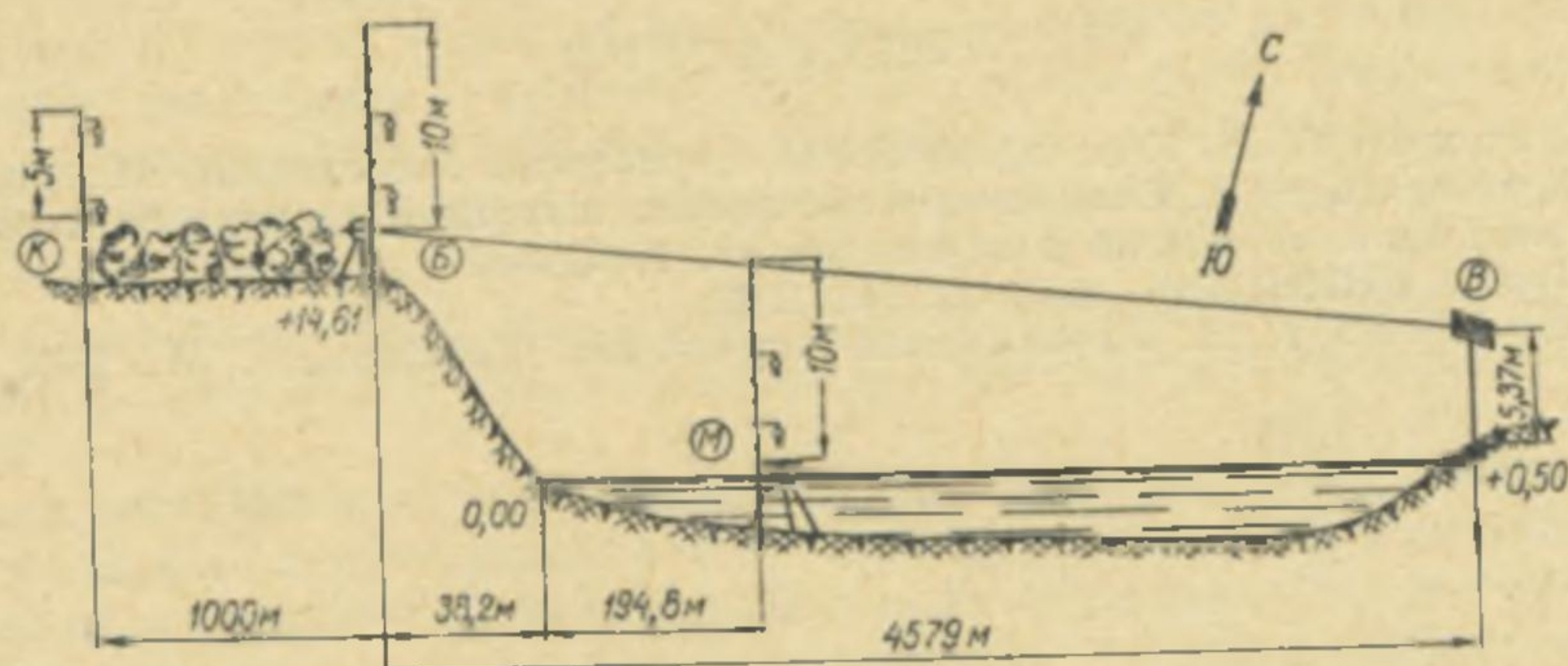


Рис. 1. Схема расположения пунктов для измерения метеозамеров и зенитных расстояний.

ры, давления и влажности приземных слоев в различных условиях местности, что позволило бы в производственном отношении применить наиболее выгодную методику работ и имело бы значительный теоретический интерес не только для геодезии, но и для других отраслей науки и техники. Особенно мало изучены эти закономерности над при-

водной поверхностью обширных водоемов. Учитывая это, автором были поставлены специальные круглосуточные одновременные измерения метеорологических элементов на разных высотах с попутным измерением зенитных расстояний в светлое время суток на лимане в северо-западной части Азовского моря.

Для измерения метеозамеров было создано три пункта, которые располагались так (рис. 1): первый (К) — среди кустарника акации в 1 км от берега; второй (Б) — на берегу лимана, третий (М) — на лимане на глубине 1,7 м (в 200 м от берега). Для размещения приборов на каждом пункте были установлены метеорологические 6-метровые мачты (ММ-49) с 5-метровыми надставками из металлических труб. Метеоприборы размещались на специальных кронштейнах с щитками от солнца на высоте 1 и 6 м от поверхности, а на высоте 11 м на пунктах Б и М располагались датчики термодпар. Возле метеорологическо-

мачты в море были укреплены на сваях столик для метеоприборов, возвышающийся на 1 м над водой, и помост для наблюдателей.

На берегу (пункт *Б*) был установлен теодолит ОТ-02 для измерения зенитных расстояний, а на противоположном берегу, на расстоянии около 4,6 км, — визирная цель (*В*) высотой 5,5 м в виде деревянного щита, окрашенного в черный цвет. Высоты пунктов относительно поверхности воды в лимане показаны на рис. 1. Линия, по которой располагались мачты и визирная цель, пересекала лиман в поперечном направлении. Теодолит располагался на правом обрывистом берегу лимана, а визирная цель — на левом пологом берегу, так что визирный луч проходил в основном над водой со средней высотой около 6—7 м.

Местность в окрестностях района работ представляла степную, слегка всхолмленную равнину. Правый обрывистый берег покрыт акациями и сосновыми невысокими насаждениями, а также фруктовыми садами, а левый представлял пашню и частично пустырь.

Наблюдения выполнены в период с 10 по 25 июля 1962 г. во время учебной практики по геодезии со студентами Коммунарского горно-металлургического института. Погода во время наблюдений была ясная, характерная для летнего периода данного района.

На каждом из пунктов *К*, *Б* и *М* на высоте 1 м над поверхностью измерялись: температура и ее вертикальный градиент, давление, влажность, направление и скорость ветра, облачность. Кроме того, на пункте *М* измерялась температура воды. Вертикальный градиент для слоя 1—6 м определялся из показаний психрометров на высотах 1 и 6 м на всех трех пунктах, а для слоя 1—11 м на пунктах *Б* и *М* определялся с помощью термопар.

При конструировании термопар для их чувствительных частей использовались две оголенные проволоки из меди и константана диаметром 0,1 мм и длиной 10 мм, концы которых припаивались к медному и константановому изолированным проводам диаметром 1 мм. Избранная конструкция мало инерционна, мало чувствительна к прямой радиации, никаких экранов не требует. При измерении градиента температур это влияние, как одновременно и одинаково действующее на обе термопары, исключается. Для измерения возникающей в термопарах электродвижущей силы применялся гальванометр типа М—117.

Перед началом и после окончания работ все приборы тщательно сверялись и определялись необходимые поправки, а также производилось эталонирование термопар с использованием больших разностей температур (в интервале 40—50°C).

Программой наблюдений предусматривалось одновременное измерение перечисленных выше метеорологических элементов на всех трех пунктах через полчаса в течение всех суток (или днем) и, кроме того, также через полчаса, измерение зенитных расстояний — четырежды приемами из пункта *Б* на пункт *В* в светлое время суток.

Наблюдения велись 13, 14 и 16 июля в светлое время суток, а 18, 19 и 20 июля — круглосуточно (без перерыва, в течение 72 часов).

Собранные материалы позволили получить всестороннюю характеристику температурного поля над лиманом и степень его влияния на величину рефракции.

Обработка материалов заключалась во введении поправок в отсчеты по метеорологическим приборам, полученным при их сравнении, вычислении средних значений. По полученным измерениям разностей температур были вычислены вертикальные и горизонтальные темпера-

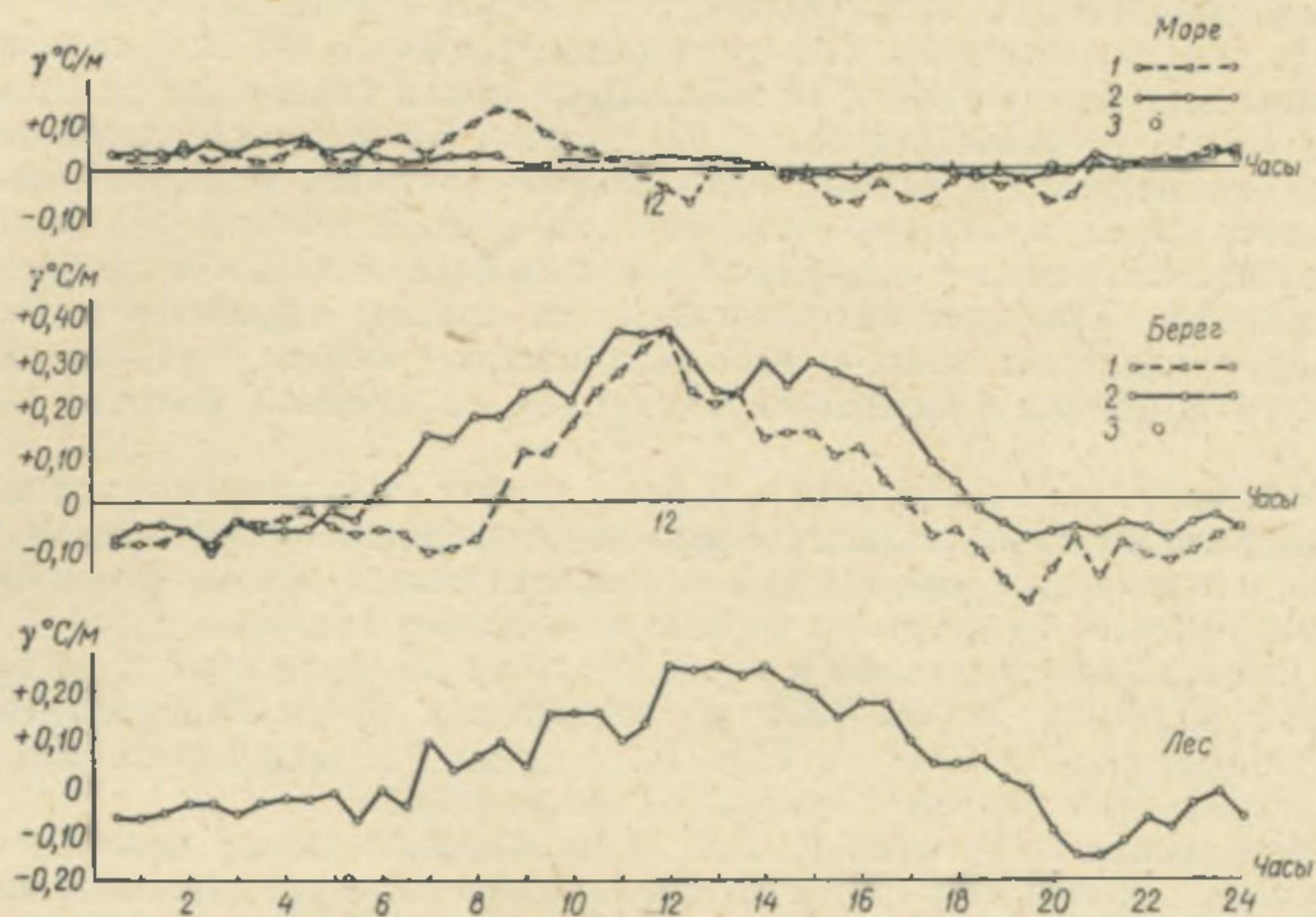


Рис. 2. График суточного хода средних получасовых значений вертикальных температурных градиентов над морем, берегом и лесом:
1 — в слое 1—6 м; 2 — в слое 1—11 м; 3 — моменты восхода и захода Солнца.

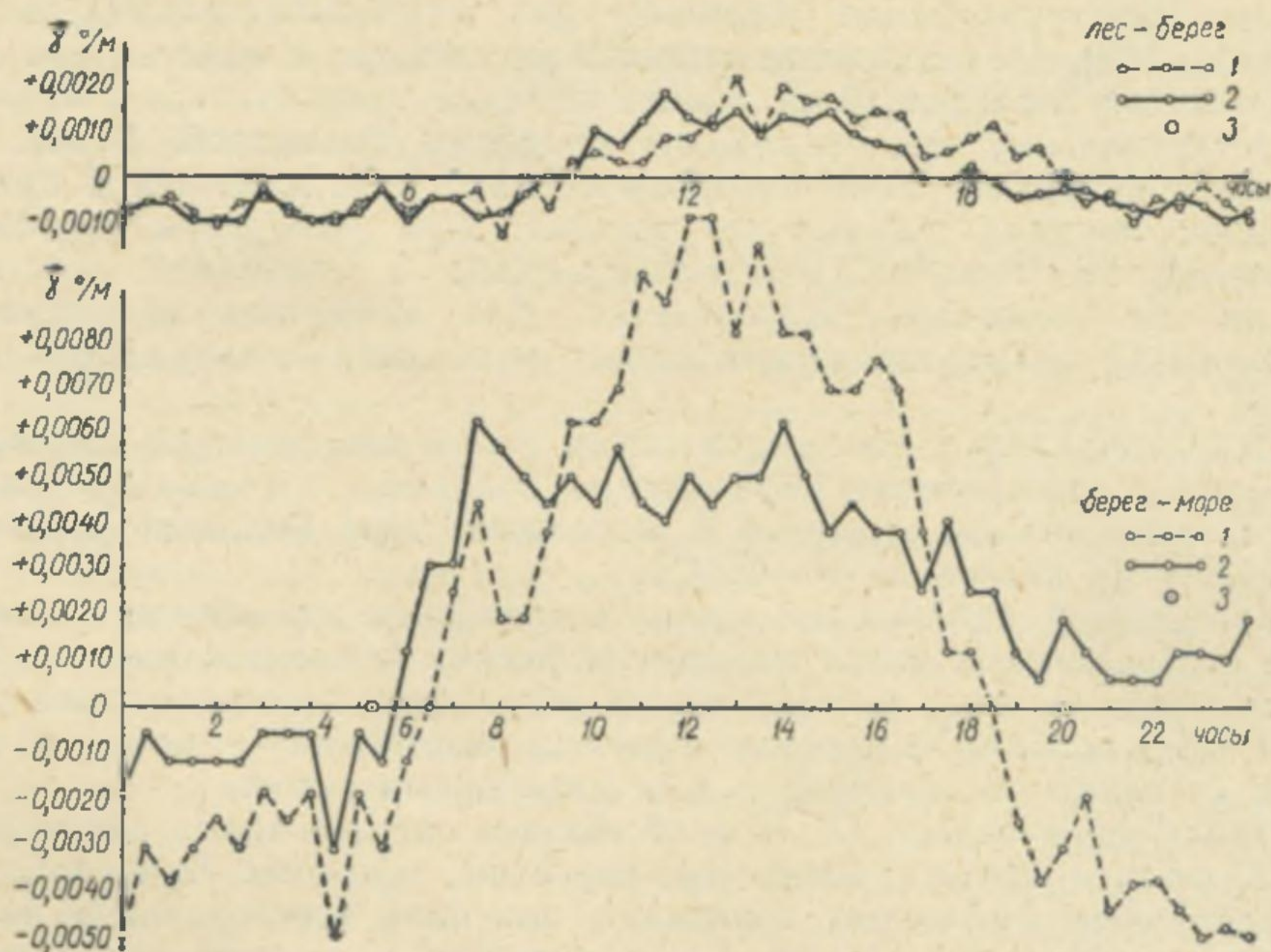


Рис. 3. График суточного хода средних получасовых значений горизонтальных температурных градиентов по направлениям «лес—берег» и «берег—море»:

1 — на высоте 1 м; 2 — на высоте 6 м; 3 — моменты восхода и захода Солнца.

турные градиенты. Вертикальные градиенты определялись для слоев воздуха 1—6 и 1—11 м по формуле:

$$\gamma = \frac{t_1 - t_2}{h}, \quad (1)$$

где t_1 и t_2 — температура воздуха соответственно по нижнему и верхнему термометрам, а h — разность высот, равная 5 и 10 м.

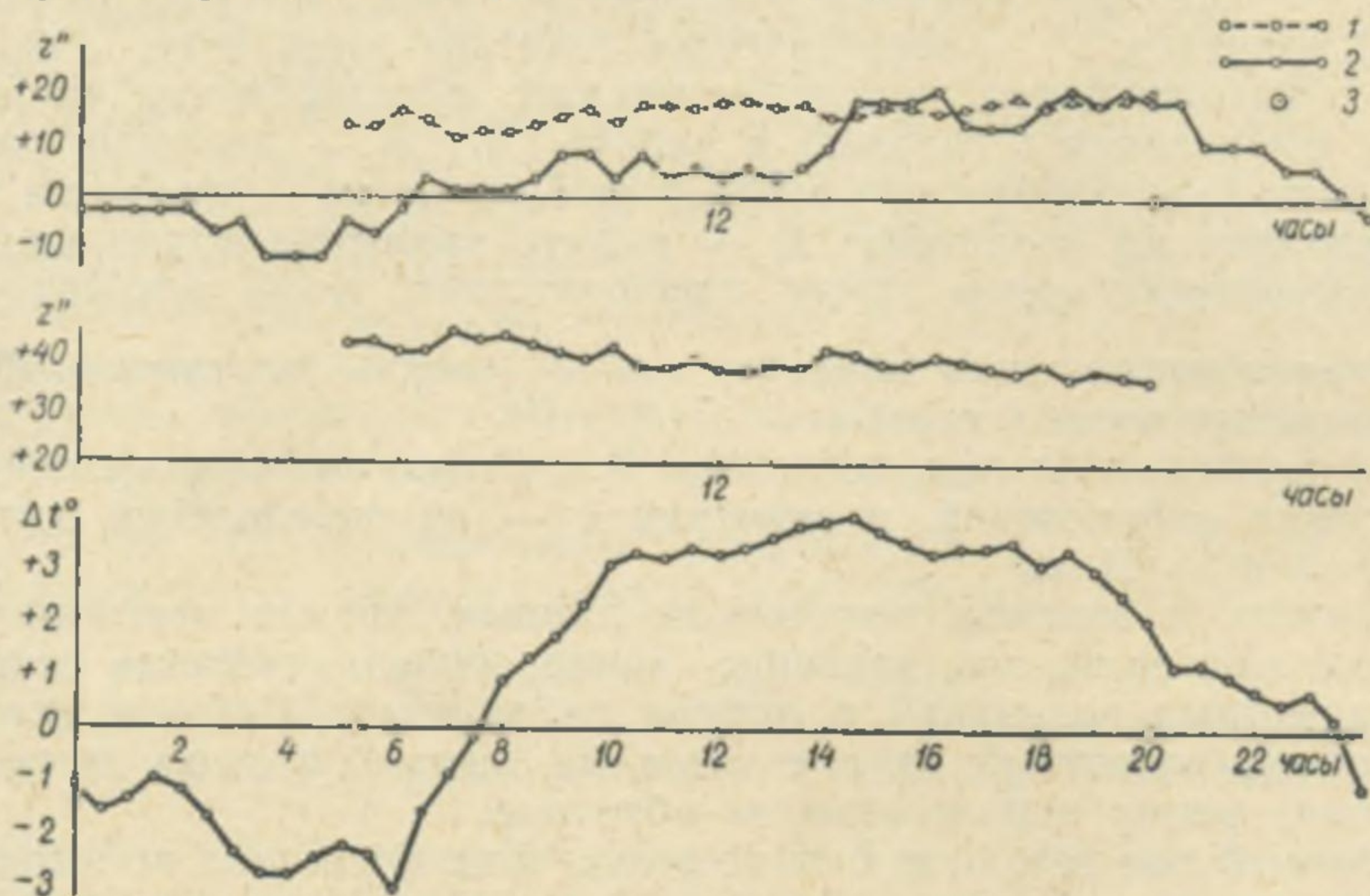


Рис. 4. График суточного хода средних получасовых значений рефракции, зенитных расстояний и разностей температур «воздух—вода»:

1 — значения вертикальной рефракции, вычисленной по измеренным зенитным расстояниям; 2 — значения вертикальной рефракции, вычисленной по измеренным метеорологическим элементам; 3 — моменты восхода и захода Солнца.

Горизонтальные температурные градиенты $\gamma_{гор}$ определялись для направлений «лес—берег» и «берег—море» для высот над подстилающей поверхностью 1 и 6 м по формуле:

$$\gamma_{гор} = \frac{t'_1 - t'_2}{s}, \quad (1')$$

где t'_1 и t'_2 — температура воздуха по заднему и переднему пункту на соответствующих высотах, а s — расстояние между пунктами. Для

вектора $\gamma_{гор}$ за положительное направление примем направление «кустарник (К)—берег (Б)—море (М)». По этому направлению модуль величины $\gamma_{гор}$ будет максимальным, так как оно пересекает линию раздела суши и моря под прямым углом, то есть направлено в сторону возрастания плотности.

Учитывая, что в период наблюдений погода была примерно одинаковой, из наблюдений γ и $\gamma_{гор}$ по всем суткам были образованы средние значения для каждого получаса, которые приводятся на графиках (рис. 2 и 3).

Кроме того, на пункте М для каждого получаса были определены средние значения разностей температур «воздух—вода» Δt , которые приводятся также на графике (рис. 4). На этом же графике показаны средние получасовые значения измеренных зенитных расстояний z , средние значения величин рефракции $r_{изм}$, определяемые по значениям

z , и $r_{\text{мет}}$, определяемые по измеренным метеорологическим элементам с помощью формул

$$r_{\text{изм}} = z^0 - z_{\text{изм}}, \quad (2)$$

$$r_{\text{мет}} = 0,2325 \frac{B}{760 (1 + \alpha t)^2} \{1 - 29,39\tau\} \frac{\rho'' \cdot s}{2R}, \quad (3)$$

где $z_{\text{изм}}$ — средняя величина измеренного зенитного расстояния для каждого получаса; z^0 — теоретическое зенитное расстояние, определяемое по отметкам точек из геометрического нивелирования (подробно порядок вычисления t изложен в работе [3]); B — давление воздуха в мм рт. ст.; t — температура в градусах Цельсия; s — проекция линии нивелирования на эллипсоид; R — радиус кривизны нормального сечения эллипсоида вдоль линии нивелирования; α — температурный коэффициент расширения воздуха; $\tau = -\frac{dT}{dh} = \gamma$ — вертикальный температурный градиент в град/м.

При вычислениях $r_{\text{мет}}$ значения B и t принимались средними из получасовых определений, а значения τ — из определений для приводного слоя 1—11 м.

Переходя к анализу полученных данных, прежде всего отметим, что такие элементы, как давление, направление и скорость ветра, не имели заметных колебаний в период наблюдений. Ветер в основном был слабый, восточный (дул с суши на лиман) и лишь ночью (на 5—6 часов) менял направление на обратное.

Суточный ход давления был обычным и не превышал по амплитуде 3—3,5 мм рт. ст.

Что касается суточного хода температуры, то он был различным для всех трех пунктов Б, М и В. Над кустарником он приближался к суточному ходу температуры над сушей. Максимум наступал около полудня (13 часов), минимум — около 5 часов, амплитуда колебалась в пределах 14—15°. Над берегом температурная кривая имела два максимума и два минимума, что связано с наложением температурного поля суши и водоема (о чем автор писал в работе [5]). Средняя величина колебания суточной амплитуды была около 12°. Над морем минимум и максимум температуры по сравнению с сушей наступали с опозданием — минимум в 6 час. утра, а максимум — в 16—17 час.; средняя амплитуда колебаний составляла около 9°.

Определенный дневной ход имела и величина Δt — разность температур воздуха и воды. Переход от отрицательных значений Δt к положительным происходил через два часа после восхода Солнца, а от положительных к отрицательным значениям около полуночи.

Более подробно рассмотрим изменения осредненных получасовых значений вертикальных и горизонтальных градиентов (см. рис. 2 и 3). Прежде всего следует отметить, что все они имеют четко выраженный суточный ход. Для вертикальных градиентов γ над кустарником и у берега этот ход мало отличается от суточного γ , описанного другими авторами, например, Девятовой [2]. Максимальные значения γ на берегу для слоев 1—6 м и 1—11 м, равные +0,36°/м, приходятся на 12 часов, а минимальные, равные для слоя 1—6 м —0,21°/м и для слоя 1—11 м —0,08°/м, — на 19 час. 30 мин. Над кустарником максимальное значение γ для слоя 1—6 м приходится на 13 час., а минимальное (—0,15°/м) — на 20 час. 30 мин. Переходы через нулевые значения для γ на берегу (в слое 1—11 м) и над кустарником наблюдаются в период 1—1,5 часа после восхода и перед закатом Солнца. Для более низкого слоя на берегу (1—6 м) переходы через нулевые

значения сдвинуты к оси симметрии кривой (полудню) на 8 час. 30 мин. утра и 17 час. вечера. Большая амплитуда суточного хода γ на берегу объясняется интенсивным прогревом в близполуденное время оголенного песчаного грунта.

В приводном слое суточные изменения величин γ имеют существенные отличия. Прежде всего суточные кривые γ для слоев 1—6 м и 1—11 м сильно сглажены. Далее, если суточная кривая γ над кустарником и берегом выпуклостью направлена вверх, то для приводного слоя эта кривая имеет обратную тенденцию. Положительными значениями γ в слое 1—6 м остаются от 21 час. вечером до 11 час. 30 мин. утра, а в слое 1—11 м — в продолжение всех суток, за исключением периода с 14 час. до 20 час. 30 мин. Резко уменьшается амплитуда суточного хода γ , особенно для слоя 1—11 м — от $+0,07^\circ/\text{м}$ до $-0,02^\circ/\text{м}$. В слое 1—6 м амплитуда γ колеблется в пределах от $+0,14^\circ/\text{м}$ до $-0,07^\circ/\text{м}$. Следует подчеркнуть, что в слое 1—6 м величины γ подвергаются резким изменениям в течение всех суток, что объясняется особенностями турбулентного обмена приводного слоя воздуха.

Суточный ход горизонтальных градиентов $\gamma_{\text{гор}}$ в общем следует за суточным ходом температурного поля. Отметим, что если для направления «лес—берег» изменения $\gamma_{\text{гор}}$ вообще сходны с описанными ранее для других условий на суше [7], то для направления «берег—море» они имеют характерные особенности. Прежде всего, величина модуля $\gamma_{\text{гор}}$ в этом случае примерно в пять раз больше по сравнению с направлением «лес—берег». Особенно это видно на высоте 1 м, что объясняется усиленным турбулентным обменом приводного слоя.

Наибольшие по модулю значения $\gamma_{\text{гор}}$ наблюдаются с одним знаком около 12—13 час. дня, а с противоположным знаком — около 24 час. Максимальное значение средней величины модуля $\gamma_{\text{гор}}$ на высоте 1 м для направления «берег—море» равно $+0,0100^\circ/\text{м}$, а на высоте 6 м — $+0,0065^\circ/\text{м}$; для направления «лес—берег» на высоте 1 м — $+0,0020^\circ/\text{м}$ и на высоте 6 м — около $+0,0015^\circ/\text{м}$.

Переход через нулевые значения величины $\gamma_{\text{гор}}$ происходит: для направления «лес—берег» на высоте 6 м в 9 час. утра и 17 час. вечера, то есть примерно совпадает с периодом спокойных изображений, а на высоте 1 м в 9 час. утра и 20 час. вечера, то есть вечерняя изотермия «опаздывает»; для направления «берег—море» на высоте 6 м — в 5 час. 30 мин. утра и 19 час. 30 мин. вечера, то есть в периоды, близкие к восходу и закату солнца, а на высоте 1 м — в 6 час. 30 мин. утра и 18 час. 30 мин. вечера, то есть близко к периоду спокойных изображений.

Таким образом, для направления «лес—берег» при измерении горизонтальных углов программу можно построить таким образом, что влияние горизонтальной рефракции будет сведено к минимуму, если измерения углов выполнять в периоды, близкие к изотермии. Для направления «берег—море» влияние горизонтальной рефракции невозможно исключить, так как почти все светлое время дня (в том числе и в периоды спокойных изображений) значения $\gamma_{\text{гор}}$ положительны.

Величина горизонтальной рефракции σ'' для этих условий может быть рассчитана по известной формуле:

$$\sigma'' = 10,9 \frac{B}{T^2} s \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4)$$

где T — абсолютная температура, $\frac{\partial T}{\partial x}$ — горизонтальный градиент

температуры, направленный перпендикулярно к линии визирования. Значит, при измерении углов для линии длиной около 10 км, проложенной вдоль берега, где днем наибольшие значения средних величин

$\gamma_{\text{гор}}$ для высоты 1 м над почвой равны около $0,01^\circ/\text{м}$, а для высоты 6 м — $0,005^\circ/\text{м}$, значения σ'' будут соответственно $8''$ и $4''$. Не учитывать этого обстоятельства невозможно.

Суточные изменения средней величины вертикальной рефракции $r_{\text{изм}}$ в приводном слое воздуха, показанные на графике (рис. 4), небольшие. Амплитуда их колебаний в светлое время дня находится в пределах $9''$. Большие колебания $r_{\text{изм}}$ отмечаются в первую половину дня, меньшие — во вторую (амплитуда $4''$), что подтверждает ранее полученные автором выводы [5]. Суточный ход, очень характерный для величин $r_{\text{изм}}$ в других условиях местности [1, 4], над приводным слоем выражен очень слабо. Если сравнить график изменения величин $r_{\text{изм}}$ и величин γ для слоя 1—11 м (рис. 2), то можно отметить их подобие. Во второй половине дня величины γ для этого слоя близки к нулю, а в первой половине их колебания более значительны. Это приводит нас к выводу о том, что наиболее благоприятным временем для измерения зенитных расстояний в данных условиях является вторая половина дня.

Приведенные на том же графике (рис. 4) величины $r_{\text{мет}}$ близки по своим значениям к величинам $r_{\text{изм}}$. Особенно близко эти величины совпадают во вторую половину дня, что свидетельствует об устойчивой стратификации приводного слоя 1—11 м в это время. Ночью $r_{\text{мет}}$ сильно меняется и имеет отрицательные значения. Это говорит о том, что при ночных измерениях зенитных расстояний над водными поверхностями следует ожидать значительного и сильно изменяющегося влияния рефракции. Суточный ход величин $r_{\text{мет}}$ имеет большую амплитуду (около $30''$), но характерно, что переходы через нулевые значения совпадают с переходами через нуль в разностях Δt температур воздуха и воды, которые приводятся на этом же графике. Таким образом, величины Δt позволяют косвенно судить о характере действия вертикальной рефракции, что очень важно, так как эти величины сравнительно легко измерять.

Известно, что величина рефракции (вертикальной и горизонтальной) является сложной функцией пространства и времени. Ее изменения могут быть как периодическими, так и случайными. Периодические изменения определяются суточными и сезонными изменениями интенсивности солнечной радиации, подстилающей поверхностью, а также климатическими особенностями данного района. Случайные изменения вызваны сменой воздушных масс, характером турбулентного движения, микроклиматическими условиями района работ и т. д.

Основным фактором, определяющим величину рефракции, есть температурное поле и его изменения во времени (суточный и годовой ход) и пространстве (вертикальный и горизонтальный градиенты).

Зависимость между коэффициентом рефракции и основными метеорологическими элементами выражается известной формулой Иордана:

$$\kappa = 0,2325 \frac{B}{760(1+at)^2} \{1 - 29,39\tau\}, \quad (5)$$

где κ — коэффициент вертикальной рефракции для дифференциально малого отрезка световой кривой; остальные обозначения прежние. Но

использование этой формулы не достигает цели [4], так как значение τ практически определяется только в конечных точках линии, для которой измеряются горизонтальные или вертикальные углы. В ряде исследований по метеорологии [3, 6] показано, что можно теоретически выразить периодическую зависимость температуры от времени дня и высоты над подстилающей поверхностью.

В наиболее простом виде эту зависимость можно представить так:

$$T_z = T_0 + bz^n, \quad (6)$$

где T_z и T_0 — значения температуры на уровне z и начальном, b и n — коэффициенты, которые вычисляются из уравнения прямой

$$\lg (T_z - T_0) = \lg b + n \lg z, \quad (6')$$

где $\lg b$ — начальная ордината, а n — отношение ординат

$$n = \frac{\lg (T_z - T_0)}{\lg z}. \quad (6'')$$

Для более полного выражения зависимости температуры от времени суток и высоты над подстилающей поверхностью ее можно представить в виде следующего уравнения:

$$T = T_0 - \gamma z + \Delta T(z, t), \quad (7)$$

где T_0 — температура у подстилающей поверхности; γ — вертикальный температурный градиент; z — высота над подстилающей поверхностью; $\Delta T(z, t)$ — суточные изменения температуры на высоте z в момент t .

Используя известное уравнение теплопроводности атмосферы:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (8)$$

где K_z — коэффициент турбулентности, можно получить для ΔT (ограничиваясь одной гармоникой):

$$\Delta T(z, t) = A \cdot e^{-az} \cos \left(\frac{2\pi}{24} t - az \right), \quad (9)$$

где $a = \left(\frac{\pi}{24K_z} \right)^{1/2}$ и A — амплитуда изменения температуры у земной поверхности.

При решении уравнения (8) предполагается, что K_z не меняется с высотой (при определенных условиях это имеет место, при других условиях K_z незаметно изменяется с высотой, то есть $K_z = K_z(z)$).

В качестве первого краевого условия задается суточный ход температуры у земной поверхности:

$$(\Delta t)_{z=0} = A \cos \frac{2\pi t}{24}. \quad (9')$$

За начальный момент t (выражаемое в часах) — принимается момент максимума температуры. Амплитуда A определяется как полуразность изменения температуры у земной поверхности $(T_{\max} - T_{\min})/2$.

Второе краевое условие заключается в том, что суточный ход температуры на больших высотах затухает. Величина K_z , определяющая среднее турбулентное состояние атмосферы, изменяется в широком диапазоне от величин порядка коэффициента молекулярной диффузии до $10^4 - 10^5$ см²/сек. Средние значения K_z на высоте 1 м в дневных

условиях в теплое время года на суше имеют порядок $1500\text{--}2000\text{ см}^2/\text{сек}$. Над обширными водными поверхностями K_z в приводном слое воздуха зависит от скорости ветра и от степени волнения.

Такой подход к решению этой задачи применяется и другими авторами [1], но в несколько ином виде.

Приведенная формула (9) достаточно полно отражает такие суточные изменения температурного поля и его вертикального градиента в районе наших наблюдений как суточный ход, уменьшение амплитуды и абсолютной величины градиентов с высотой, что наглядно видно из графика на рис. 2.

Используя эту формулу, можно более надежно определять значение τ в формуле (5), а следовательно, — и значения коэффициента рефракции.

Выводы

1. Температурное поле приводного слоя и его основные характеристики (суточный ход, вертикальный и горизонтальный градиенты) над обширными водоемами имеют свои характерные особенности, вызванные особым режимом теплообмена над поверхностью воды. Это выражается в сдвиге вправо в суточной температурной кривой и уменьшении ее амплитуды, в уменьшении суточных колебаний вертикальных градиентов и преобладании положительных их значений. При этом в слое 1—11 м колебания этих градиентов в течение суток примерно в два раза меньше, чем в слое 1—6 м, а наименьшие колебания отмечаются во второй половине дня. Разность температуры воздуха и воды положительна в период с 8 до 23 час., что находит отражение на суточном ходе остальных метеозаэлементов.

2. Температурное поле у берега водоема определяется наложением температурного поля суши на температурное поле над водой, вследствие чего температурная кривая имеет два максимума и два минимума. Величина и суточный ход вертикальных градиентов примерно такие же, как и над сушей. Горизонтальные градиенты направления «берег—море» примерно в пять раз больше, чем для направления «лес—берег», имеют суточный ход с преобладанием днем положительных значений.

3. Колебания вертикальной рефракции над обширным водоемом при средней высоте луча 7 м значительно меньше, чем при тех же условиях над сушей, особенно во вторую половину дня, которую следует считать наиболее благоприятной для измерения зенитных расстояний. При понижении высоты луча нужно ожидать больших колебаний вертикальной рефракции; суточный ее ход выражен очень слабо.

4. При дневных измерениях горизонтальных углов по линиям, прокладываемым вдоль берега водоемов, влияние горизонтальной рефракции невозможно исключать, так как ее величина в течение дня остается положительной, достигая наибольшего значения в близполуденное время. Для ее исключения необходима комбинация дневных и ночных измерений.

5. Значение вертикальной рефракции, вычисленное по измеренным метеозаэлементам, получается положительным, когда воздух теплее воды, и отрицательным, когда вода теплее воздуха. Хорошее совпадение этих значений с полученными из наблюдений отмечается во второй половине дня.

6. Для уточнения значений коэффициента рефракции, вычисляемого по измеренным метеозаэлементам с использованием формулы (5), предлагается дополнительно использовать формулу (9), дающую возмож-

ность по температуре у подстилающей поверхности определить температуру на заданной высоте и определенное время суток. Эта формула достаточно полно отражает такие изменения поля градиента температуры, как уменьшение его амплитуды и абсолютной величины с высотой и суточные колебания, что подтверждается анализом полученных наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бомфорд Г. Геодезия. Геодезиздат, М., 1958 (перевод с английского).
2. Девятова В. А. Микроаэрологические исследования нижнего километрового слоя атмосферы. Гидрометеониздат, М., 1957.
3. Дородницын А. А. К теории суточного хода температуры в слое перемешивания. ДАН СССР, 30, № 5, 1940.
4. Маслич Д. И. О точности геодезического нивелирования в горных условиях. Львов, 1957.
5. Маслич Д. И. Опыт передачи высоты через значительное водное препятствие тригонометрическим нивелированием. «Геодезия и картография», 1963, № 9.
6. Швец М. Е. Суточный ход температуры и лучистый теплообмен. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз. 1943, № 4.
7. Юношев Л. С. О квазистационарных блоках боковой рефракции. Изв. вузов, серия «Геодезия и аэрофотосъемка», 1965, № 3.

Работа поступила
21 марта 1966 г.