

## **Разработка метода учета и прогноза рефракции радиоволн**

В.С. Никитина<sup>1</sup>, А.Д. Кузнецов<sup>1</sup>, В.Ю. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет

192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79.

E-mail: [victoriaflint01@gmail.com](mailto:victoriaflint01@gmail.com)

*Предложен метод учета и прогнозирования рефракции радиоволн в тропосфере Земли, основанный на физико-математических и геометрических моделях. Показаны преобладающие типы рефракции радиоволн по сезонам для Санкт-Петербурга и Ленинградской области и построены траектории распространения радиолуча, соответствующие этим типам. Разработана модель восстановления высотного профиля коэффициента преломления над водной поверхностью Ладожского озера в отсутствие прямых измерений. Приводится физическое обоснование возникновения сверхрефракции над Ладожским озером и предлагается метод учета сверхрефракции при радиолокационных наблюдениях.*

*Ключевые слова: радиолокация, рефракция, моделирование, траектория радиолуча, статистическая обработка данных.*

## **Development of a method for accounting for radio wave refraction**

V. S. Nikitina<sup>1</sup>, A. D. Kuznetsov<sup>1</sup>, V. Yu. Zhukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Russian state hydrometeorological university

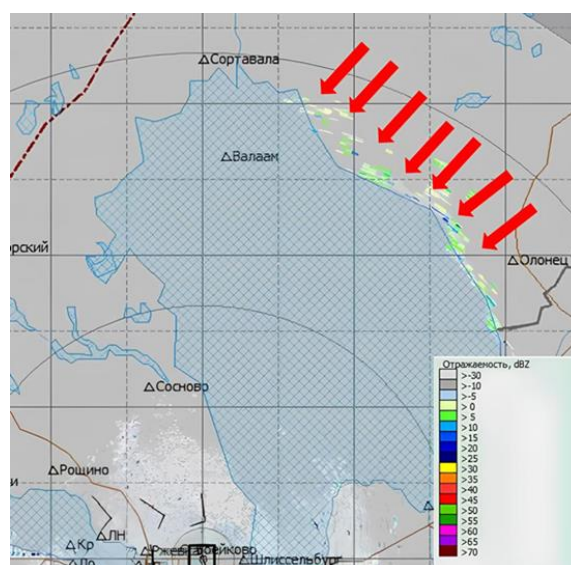
*A method for accounting for radio wave refraction in the Earth's troposphere is proposed, based on physical, mathematical, and geometric models. The predominant types of radio wave refraction are shown by season for St. Petersburg and the Leningrad region, and radar electromagnetic wave trajectories corresponding to these types are constructed. A model for reconstructing the vertical profile of the refractive index over the water surface of Lake Ladoga in the absence of direct measurements is developed. A physical justification for the occurrence of superrefraction over Lake Ladoga is presented, and a method for accounting for superrefraction in radar observations is proposed.*

*Keywords: radiolocation, refraction, mathematical modeling, radio beam trajectory, data statistical processing.*

## **Введение**

Известно, что разные типы рефракции по-разному влияют на траектории распространения радиоволн в атмосфере, что приводит к погрешностям в определении координат целей [1, 2]. Расчеты таких погрешностей при различных типах рефракции подробно освещены в ранних работах авторов [3, 4]. Установлено, что наибольшие погрешности в определении координат исследуемых объектов вносит сверхрефракция. Такой тип рефракции чаще всего выражен над обширными водными объектами. Это подтверждается многолетними наблюдениями, произведенными ДМРЛ-С Воейково, расположенном в поселке Воейково Ленинградской области. В жаркие летние дни при наличии температурной инверсии и при стабильной атмосфере радиолокатор фиксирует в качестве цели очертания северного берега озера (рисунок 1). Поскольку радиолуч явно достигает земли, можно сделать вывод о том, что в таком случае наблюдается сверхрефракция, и требуется особый учет погрешностей, возникающих из-за кривизны траектории луча, отличной от кривизны при стандартной рефракции. Из этого следует необходимость подробно рассматривать физические условия,

приводящие к возникновению сверхрефракции над водоемом и строить особую математическую модель расчета траектории луча.



**Рис. 1. Случай сверхрефракции, отображенный на радиолокационной карте в канале вертикальной отражаемости, зарегистрированный 10 сентября 2024 года в 12.00 ВСУ**

### **Метод прогнозирования рефракции**

Основываясь на корреляционных связях коэффициента преломления, подробно описанных в работе [3], можно порекомендовать следующий способ прогнозирования рефракции радиоволн.

На высоте 30 м над поверхностью земли (высота установки радиолокатора) необходимо установить датчики измерения метеорологических параметров. Затем по результатам измерений рассчитать значение коэффициента преломления на высоте радиолокатора и проэкстраполировать его в соответствии с корреляционными связями по следующей формуле:

$$(h) = \mu_n(h) + \hat{R}(h) \frac{\sigma_h}{\sigma_0} (\mu_{n0} - \tilde{n}_0), \quad (1)$$

где  $n(h)$  – расчетное значение коэффициента преломления на высоте  $h$  над антенной,  $\mu_{n0}$  и  $\mu_n(h)$  – математическое ожидание коэффициента преломления на высоте антенны и на высоте  $h$  соответственно,  $\hat{R}$  – коэффициент автокорреляции коэффициента преломления на высоте  $h$ ,  $\sigma_{n0}$  и  $\sigma_n(h)$  – дисперсии коэффициента преломления на высоте антенны и на высоте  $h$  соответственно,  $\tilde{n}_0$  – оценка коэффициента преломления на высоте антенны.

При допущении, что полученный профиль коэффициента преломления остается неизменным на расстоянии 50 км от антенны и соответствует зависимости  $\mu_n(h)$  на больших расстояниях, экстраполируется градиент коэффициента преломления и тип рефракции и получают погрешности к оценкам высоты целей на разном расстоянии от антенны.

### **Учет рефракции над сушей и водой при различной температурной стратификации атмосферы**

На распространение радиоволн в атмосфере значительно влияет неоднородность подстилающей поверхности по ходу следования волн. Однородная безводная подстилающая поверхность создает более предсказуемые условия для

распространения. Присутствие же водной поверхности может привести к резкому изменению траектории. Если по пути следования электромагнитной волны радиолокатора наблюдается переход подстилающей поверхности от суши к воде, то это может повлиять на точность обнаружения целей.

Следует также учесть, что в атмосфере наблюдаются два случая распределения (стратификации) метеопараметров – нормальное (стандартное) распределение температуры, давления и влажности, и инверсия, при которой температура возрастает с высотой. Учитывая это, можно структурировать условия распространения радиоволн на четыре группы: над сушей при отсутствии инверсии температуры, над сушей при наличии инверсии температуры, над водой при отсутствии инверсии температуры, над водой при наличии инверсии температуры.

Для учета и прогноза рефракции по методу, описанному выше, рассчитывались статистические характеристики рядов значений коэффициента преломления по данным о распределении метеовеличин, полученных с аэрологической станции Воейково. Пересчет профилей метеовеличин в профили коэффициента преломления производился по методике, представленной в ранних работах авторов [3, 4]. Затем строились траектории, соответствующие типичным типам рефракции для Санкт-Петербурга и Ленинградской области отдельно для теплого и холодного периода. Было установлено, что при наличии и отсутствии инверсии температуры в холодный период года в исследуемом регионе как над сушей, так и над водой преобладал пониженный тип рефракции.

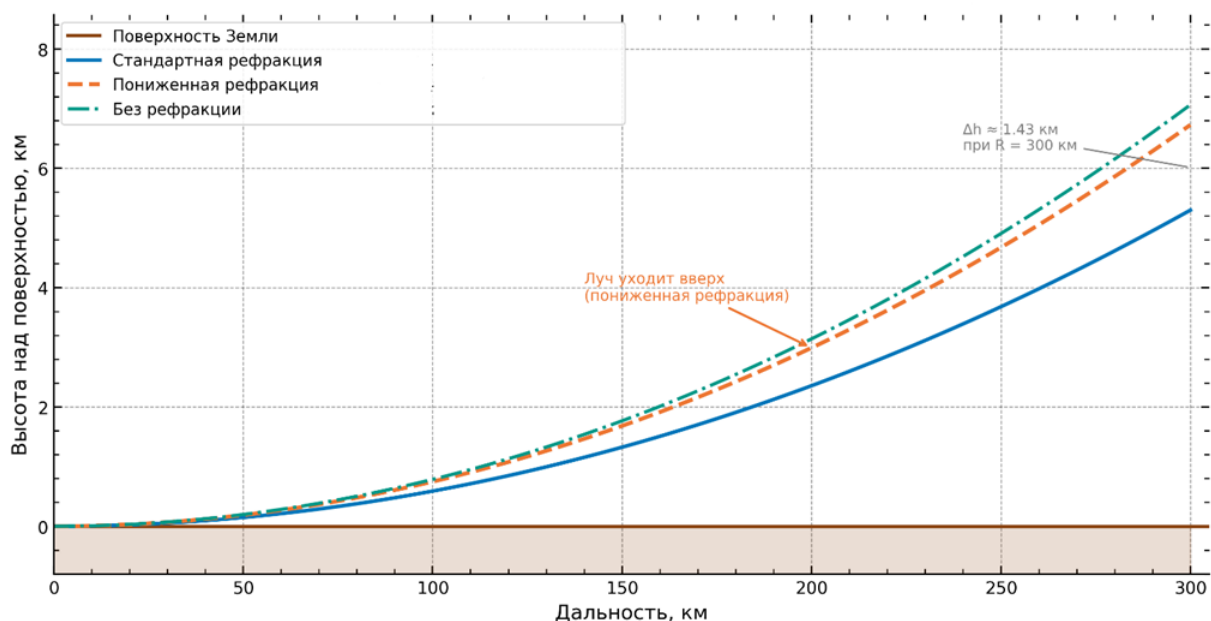
Следующим шагом производилась экстраполяция коэффициента преломления по формуле 1. Значения коэффициента преломления на высоте антенны пересчитывались по данным о метеовеличинах, полученным с метеостанции, установленной на вышке ДМРЛ-С Воейково на высоте 30 м над уровнем земли. В результате получалось высотное распределение индекса коэффициента преломления до верхней границы 700 м. Это обусловлено тем, что именно до такой высоты наблюдаются значимые корреляционные связи значений исследуемой величины. С учетом радиуса корреляции было принято, что до расстояния 50 км от радиолокатора горизонтальный профиль индекса коэффициента преломления постоянен.

Результаты экстраполяции показали, что, согласно восстановленным профилям, в холодный период года над сушей при наличии и при отсутствии температурной инверсии в исследуемом регионе преобладал пониженный тип рефракции со средним градиентом  $dn/dz = -2,4 \cdot 10^{-8}$  1/м, при котором траектория луча обращена вогнутой стороной к поверхности земли. Типичная траектория луча в таком случае представлена на рисунке 2.

В холодный период, как при наличии температурной инверсии, так и без неё, над акваторией Ладожского озера по данным ДМРЛ-С Воейково не фиксировались радиолокационные погрешности, например, ложное отображение северного берега. Из-за отсутствия детальных измерений профилей метеовеличин над озером можно предположить, что зимой при стабильной атмосфере профиль коэффициента преломления над водой аналогичен профилю над сушей. В этом случае логично заключить, что над озёрной поверхностью также доминирует пониженная рефракция, что подтверждается отсутствием характерных ошибок, включая эффекты сверхрефракции, в рассматриваемый период.

В теплый период года при наличии температурной инверсии ДМРЛ-С Воейково воспринимает северный берег Ладожского озера в качестве цели. В этом случае можно говорить о траектории луча, отличной от траекторий при нормальном и пониженном типе рефракции. Поскольку луч явно в этом случае упирается в землю, можно сделать

вывод о наличии сверхрефракции над водной поверхностью озера в теплый период года при наличии температурной инверсии.



**Рис. 2. Типичная траектория антенного луча ДМРЛ-С, полученная по экстраполированным данным (оранжевая пунктирная линия) в сравнении с траекторией при стандартном типе рефракции и при ее отсутствии**

### **Метеорологические условия, приводящие к возникновению сверхрефракции над Ладожским озером**

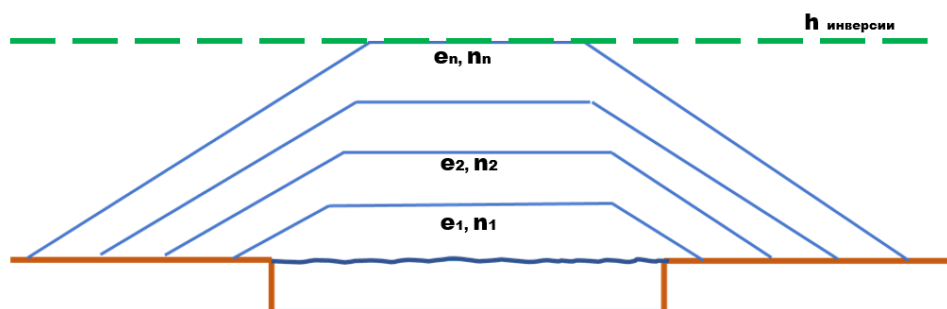
В сентябре 2024 года наблюдалось 14 дней со сверхрефракцией, возникающей над Ладожским озером – 2, 4, 6 – 15, 17 и 25 сентября, в среднем с 9 до 14 часов ВСВ. При анализе данных аэрологического зондирования атмосферы было установлено, что в дни появления сверхрефракции, в 00 часов ВСВ всегда наблюдалась приземная температурная инверсия, а в 12 часов – приподнятая на высоте 2 – 3 км. Значит, можно предположить, что именно наличие инверсионных слоёв вызывают преломление луча по типу сверхрефракции. К сожалению, ввиду отсутствия технических средств и финансового обеспечения, провести аэрологическое зондирование атмосферы над Ладожским озером и оценить наличие температурной инверсии над водой в исследуемый период было невозможно. Однако, в качестве гипотезы можно предположить наличие приподнятой инверсии над акваторией Ладожского озера. Основываясь на гипотезе, моделировались метеорологические условия над Ладожским озером, приводящие к сверхрефракции.

Из-за своей протяженности и объема озеро обладает высокой теплоемкостью, что замедляет нагрев и охлаждение воды по сравнению с сушей. Это приводит к тому, что, во-первых, в теплый период вода в озере прогревается медленнее, чем окружающая суша. Во-вторых, испарение с поверхности озера насыщает нижний слой атмосферы влагой, повышая влажность воздуха над поверхностью воды и в прибрежной зоне.

В теплое время суток, особенно с утра, солнечная радиация нагревает поверхность озера. В результате испарения воды с поверхности нижний слой атмосферы интенсивно насыщается водяным паром. При этом влажный воздух у поверхности воды может быть относительно прохладным, особенно если вода еще не сильно прогрелась, что создает условия для возникновения устойчивого вертикального слоя с высокой

влажностью. Высота такого слоя будет примерно соответствовать высоте температурной инверсии. Значения парциального давления будут постепенно уменьшаться от уровня поверхности воды, где парциальное давление равно давлению насыщения, до высоты инверсии.

В результате подобного распределения линии равных значений парциального давления водяного пара формируют над озером призму. Такая призма представляет собой трехмерную область с резким вертикальным и горизонтальным градиентом парциального давления. Снизу она ограничена поверхностью озера, сверху – слоем инверсии, а по бокам – распространяется на прилегающую сушу, формируя над сушей клин влажного и прохладного воздуха (рисунок 3). В этом клине влажность остается высокой, а температура воздуха ниже, чем в окружающем более сухом и теплом воздухе над сушей.



**Рис. 3. Призма, образованная линиями равных значений парциального давления водяного пара (так же и коэффициента преломления)**

Механизм формирования такой структуры следующий – в дневное время поверхность суши нагревается быстрее, чем поверхность озера, и это создает область пониженного давления над сушей и более высокого давления над озером. В результате более холодный и влажный воздух с озера начинает перемещаться в сторону суши – формируется дневная бризовая циркуляция [5]. Дневной бриз переносит прохладный и влажный воздух с поверхности Ладожского озера на сушу, поднимая его в нижние слои атмосферы, ограниченные высотой 100 – 200 м.

При антициклональном характере погоды (в случае ясного неба и при слабом ветре) вертикальное перемешивание воздуха ограничено. Влажный воздух, поднимающийся с озера, оказывается «заперт» под более теплым и сухим воздухом над сушей, поэтому клиновидная структура линий равных значений парциального давления водяного пара может довольно долго сохраняться, проникая вглубь суши.

Таким образом, призма, образуемая линиями равных значений парциального давления водяного пара, представляет собой особое распределение влажности, характерное для территории Ладожского озера и его прибрежных зон, возникающее при приподнятой температурной инверсии и поддерживаемое дневным бризом и устойчивой стратификацией атмосферы. Именно такая структура эффективно создает условия возникновения сверхрефракции радиоволн, наблюдаемой ДМРЛ-С в Воейково. Радиолокационный луч проходит через клин призмы, постепенно распространяясь из слоев с низкими значениями парциального давления в слои с высоким значением парциального давления. Следовательно, его траектория постепенно проходит от слоев с низкими значениями коэффициента преломления  $n$  к слоям с высокими значениями. То есть луч переходит из менее оптически плотных слоев в более оптически плотные, что вызывает его преломление и изгиб траектории, соответствующий сверхрефракции.

При отсутствии приподнятой температурной инверсии призма влажного воздуха не формируется, и, как следствие, не возникает сверхрефракция радиоволн. Это происходит из-за того, что если приподнятой инверсии нет, то температура с высотой имеет стандартный ход, а значит, атмосфера становится менее стабильной. При этом возникает активное вертикальное перемешивание и турбулентность, которые размывают локальные слои влажности. Поэтому влажный воздух у поверхности озера быстро смешивается с более сухим воздухом выше. Без «крышки» температурной инверсии влажный воздух не удерживается в нижнем слое, и призматическая структура линий равных значений парциального давления водяного пара не возникает. Отсюда следует, что градиенты влажности и показателя преломления становятся более плавными и менее выраженными, что приводит к отсутствию условий для возникновения сверхрефракции.

Таким образом, можно сделать вывод, что сверхрефракция над водоемами, в частности над Ладожским озером, может появляться в случае одновременного возникновения нескольких метеорологических ситуаций. Зная эти ситуации и факторы, к ним приводящие, можно говорить о прогнозе и учете типа рефракции при производстве радиолокационных наблюдений.

Во-первых, обязательным условием возникновения сверхрефракции над водными объектами является наличие приподнятой инверсии температуры над водной поверхностью, поскольку именно в таком случае формируется запирающий слой, являющийся первостепенной причиной изменения оптической плотности слоев атмосферного воздуха.

Во-вторых, очень большую роль в искривлении траектории волны по типу сверхрефракции играет динамическая стабильность слоев атмосферы, то есть отсутствие сильного ветра и перемешивания. Такие условия позволяют инверсии температуры и градиентам влажности сохраняться дольше. Могут наблюдаться следующие метеорологические условия, при которых это возможно:

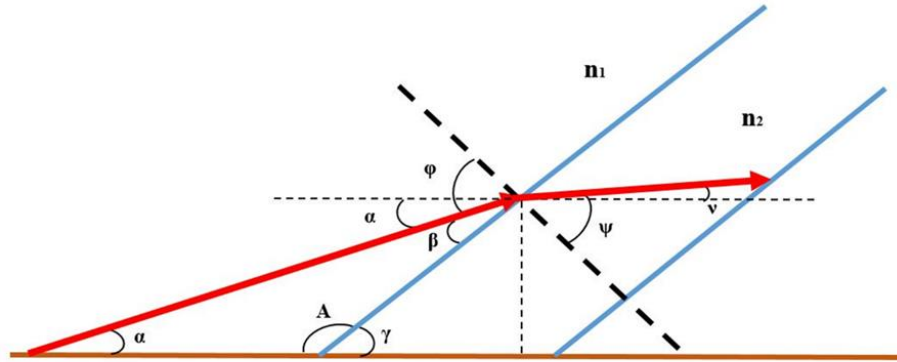
- при перемещении теплых сухих воздушных масс с суши на более холодную водную поверхность в летнее время;
- над сушей при ясной безоблачной погоде ночью, при возникновении приземных радиационных инверсий температуры, сопровождающихся образованием росы;
- в антициклональных областях (зонах повышенного давления), вследствие оседания воздуха на верхних уровнях при образовании так называемой инверсии сжатия [5]. Следует отметить, что в дни выпадения осадков сверхрефракция, как правило, не наблюдается.

Сопоставляя вышеописанные факторы, можно говорить о прогнозе ситуаций, при которых будет возникать сверхрефракция в слоях атмосферы вблизи водоема и над его поверхностью. Учитывая отсутствие аэрологических наблюдений над водными объектами, можно рекомендовать развивать аэрологическую сеть и в целях повышения качества получаемой радиолокационной информации открывать новые аэрологические станции с выпуском зондов над водными объектами.

### **Построение траектории электромагнитной волны над Ладожским озером**

Анализируя вышеописанную призму, можно сказать, что волна прежде всего пройдет через клиновидную структуру, образованную линиями равных значений парциального давления водяного пара над сушей и в прибрежной части озера, а затем через плоскопараллельный участок над самим озером. Геометрия луча радиолокатора при прохождении через клин в таком случае будет соответствовать рисунку 4.





**Рис. 4. Геометрия луча, проходящего через клин призмы**

Здесь  $\alpha$  – угол места лоатора;  $\beta$  – угол между лучом и поверхностью клина, образованного линиями равных значений парциального давления водяного пара;  $\gamma$  – угол наклона клина;  $\varphi$  – угол падения луча;  $\psi$  – угол преломления луча;  $\nu$  – угол между направлением луча и горизонталью;  $n_1$  и  $n_2$  – коэффициенты преломления в первом и втором слое соответственно.

Первый этап – расчет траектории луча над сушей и высоты его входа в клин призмы. С этой целью по формуле 1 производилась экстраполяция профиля коэффициента преломления на расстояние от места установки радиолокатора до начала клина. Результаты экстраполяции показали, что высотное распределение коэффициента преломления в месте установки радиолокатора практически совпадает с высотным распределением в точке начала клина. Второй этап – расчет траектории луча, высоты его перехода в слои равного содержания водяного пара и наклонной дальности (а также ее проекции) при прохождении радиолуча через клин призмы. В данном случае траекторию следует рассчитывать с учетом наклона линий равных значений коэффициента преломления. Такой учет выполняется посредством ввода в модель расчета для сферически слоистой атмосферы, подробно описанной в работе [6], значений углов наклона. Третий этап – расчет траектории прохождения радиолуча через плоскопараллельный участок над озером.

Для построения траектории также необходимо восстановить высотный профиль коэффициента преломления над водой. Восстановления профиля производилось с использованием данных о средней температуре поверхности воды Ладожского озера для каждого месяца. Также было сделано предположение о том, что значение коэффициента преломления в слое на нижней границе инверсии было установлено равным значению коэффициента преломления над сушей в точке начала клина.

Затем, в предположении того, что высотное распределение коэффициента преломления над поверхностью озера имеет линейный характер, восстанавливались значения коэффициента преломления по формуле:

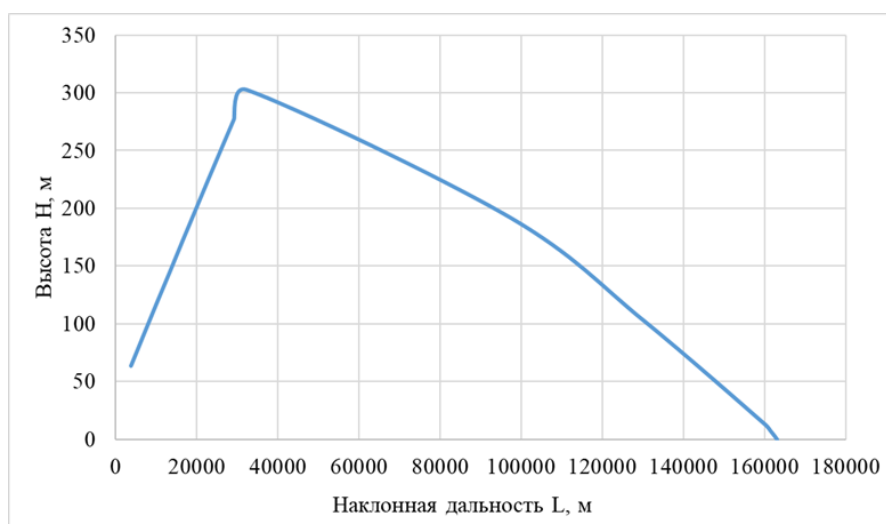
$$n_h = n_b - kh, \quad (2)$$

где  $n$  – восстановленные значения коэффициента преломления на высоте  $h$ ,  $n_b$  – значение коэффициента преломления на границе раздела воды и воздуха,  $k$  – градиент высотного распределения коэффициента преломления, определявшийся дополнительно.

Для проверки состоятельности приведенной в настоящей работе методики расчета траектории луча над озером в случае наличия температурной инверсии, был произведен расчет значений высотного распределения коэффициента преломления над поверхностью озера. Таким образом описывалась призматическая структура линий равных значений коэффициента преломления с учетом высоты температурной

инверсии. Высота задавалась согласно данным аэрологического зондирования, и на ее основе рассчитывалось количество атмосферных слоев, с учетом того, что расстояние между двумя слоями составляет 100 м. Затем, с использованием восстановленных высотных профилей коэффициента преломления, рассчитывались траектории распространения радиолуча в призме. Следует еще раз подчеркнуть, что в случае отсутствия температурной инверсии, призма водяного пара над поверхностью озера не образуется, поэтому в таком случае тип рефракции над озером будет соответствовать типу рефракции над сушей, который можно учесть при производстве наблюдений по методике, представленной в работе [6].

Пример траектории радиолуча, рассчитанной для 10 сентября 2025 года 12 часов ВСВ, представлен на рисунке 5.



**Рис. 5. Траектория распространения луча в призме**

При анализе рисунка можно выделить, во-первых, необычную траекторию распространения луча, которая отличается от привычных. На расстоянии примерно 30 км наблюдается резкое изменение направления траектории. Этот излом объясняется некоторыми упрощениями модели: авторы предположили резкий, угловатый переход от клиновидной структуры линий равных значений коэффициента преломления над сушей к плоскопараллельной структуре над водной поверхностью. На самом деле такой переход, скорее всего, происходит более плавно, однако из-за отсутствия достоверных данных о распределении метеорологических параметров и коэффициента преломления над и вокруг Ладожского озера описать его точнее невозможно.

Тем не менее, можно заключить, что луч преломляется по типу сверхрефракции над сушей, в пределах клиновидной призматической структуры. Это подтверждается тем, что на рисунке видно, как радиолуч изгибается вниз и достигает высоты 0 м при наклонной дальности около 163 км. При этом стоит отметить, что расстояние в 163 км, на котором луч, согласно расчетам, касается земли, почти совпадает с расстоянием от установки радарного лоатора в поселке Воейково до северного берега Ладожского озера, равным примерно 165 км.

Расчет траекторий радиолуча был повторен для всех сроков, в которые наблюдалась сверхрефракция по данным ДМРЛ-С Воейково. Расчеты показали, что среднее значение горизонтальной дальности для всех 14 случаев, при котором траектория луча достигает земли, составляет 169 км, что на 4 км больше расстояния до северного берега Ладожского озера, который радиолокатор воспринимает как цель при уже упомянутых условиях.



## **Выводы**

В условиях отсутствия прямых аэрологических измерений над водной поверхностью Ладожского озера была разработана математическая методика восстановления вертикального профиля коэффициента преломления радиоволн. Эта методика использует данные аэрологического зондирования, полученные над сушей, и учитывает пространственную корреляцию как по горизонтали, так и по вертикали. Благодаря этому подходу становится возможным количественно оценить отклонения траектории радиоволн от нормальной рефракции и определить условия возникновения сверхрефракции, которая приводит к появлению ложных целей.

Разработанная методика может стать фундаментом для дальнейших исследований и улучшения способов учёта радиолокационных помех, связанных с эффектами рефракции, что способствует повышению надёжности работы радиолокационных систем. Для её практического внедрения рекомендуется организовать регулярный мониторинг микроклимата прибрежных районов, а также проводить эксперименты, направленные на уточнение расстояния начала формирования клиновидной зоны влажного воздуха и характера перехода между атмосферными структурами над сушей и водой. Это позволит повысить точность моделирования траекторий радиоволн и улучшить качество радиолокационных наблюдений.

## **Литература**

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Издание 4-е. – М.: Издательство «Связь», 1972 – 335 с.
2. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии (Радиометеорология) – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. – 350 с.
3. Жуков В.Ю., Кузнецов А.Д., Никитина В.С. Исследование возможности прогнозирования искривления траектории радиоволн в тропосфере земли. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2024. – № 3(55). – С. 5-15. – DOI 10.24412/2221-2574-2024-3-5-15. – EDN BUIGBA.
4. Никитина, В.С. Разработка модели прогноза рефракции радиоволн для обеспечения работы сети штормоповещения / В.С. Никитина, А.Д. Кузнецов, В.Ю. Жуков // Всероссийские открытые Армандовские чтения "Муром 2025": Материалы Всероссийской открытой научной конференции и Молодёжной школы–конференции, Муром, 03–05 июня 2025 года. – Муром: МИ ВлГУ, 2025. – С. 259-264. – DOI 10.24412/2304-0297-2025-1-259-264. – EDN YQSTU.
5. Тверской П.Н. Курс метеорологии (Физика атмосферы); – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 700 с.
6. Никитина, В.С. Моделирование влияния рефракции на траекторию распространения радиоволн в атмосфере / В.С. Никитина, В.Ю. Жуков, А.Д. Кузнецов // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской открытой научной конференции, Муром, 27–29 июня 2023 года / Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн. – Муром: МИ ВлГУ, 2023. – С. 123-133. – DOI 10.24412/2304-0297-2023-1-123-133. – EDN YWRQXN.