

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ (МИИГАиК)

На правах рукописи

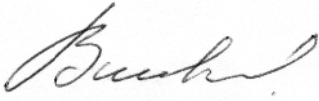
**Вшивкова Ольга Владимировна**

**РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ  
ЭФФЕКТИВНОГО УЧЕТА  
ВЛИЯНИЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ  
НА УГЛОВЫЕ И ЛИНЕЙНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

25.00.32 – Геодезия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Москва – 2010

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) на кафедре высшей геодезии

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Голубев Анатолий Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Куштин Иван Федорович,**  
доктор технических наук, профессор  
**Масленников Александр Сергеевич,**  
доктор технических наук, профессор  
**Уставич Георгий Афанасьевич**

Ведущая организация: Всероссийский Научно-Исследовательский Институт  
Физико-Технических и Радиотехнических Измерений

Защита диссертации состоится «31» марта 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д. 212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., д. 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 \_\_ года

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Климков Ю.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В неоднородной атмосфере показатель преломления непрерывно меняется во времени и пространстве. Это явление в той или иной степени снижает точность всех угловых и линейных измерений. Наибольшей изменчивостью отличается приземный слой атмосферы (ПСА) толщиной около одного километра, в котором прослеживается влияние местных (микромасштабных) неоднородностей подстилающей поверхности. В приземном слое атмосферы полностью или частично выполняют все геодезические измерения. Широкий спектр научных и хозяйственных задач, решение которых невозможно без привлечения геодезической информации, делает проблему учета влияния приземного слоя атмосферы на геодезические измерения более значимой.

Свой вклад в изучение проблемы учета влияния ПСА внесли Изотов А.А., Пеллинен Л.П., Островский А.Л., Куштин И.Ф., Вильнер Д.Г., Яковлев Н.В., Юношев Л.С., Kukkamaki T.I., Прилепин М.Т., Голубев А.Н., Михайлов В.С., Галкин Ю.С. и многие другие отечественные и зарубежные ученые. Несмотря на множество интересных и значимых исследований, проблема учета влияния ПСА на геодезические измерения до сих пор не решена. Причина этого не только в значительной изменчивости показателя преломления. С развитием геодезического производства меняются требования к методам учета влияния атмосферы, в целом становясь более жесткими.

В первую очередь следует отметить отсутствие *эффективных* (точных и оперативных) методов учета влияния ПСА. Возможности современных методов и средств геодезических измерений по точности и оперативности отвечают требованиям большинства геодезических задач, между тем отсутствие адекватных по *точности* и *оперативности* методов учета влияния ПСА не позволяет в полной мере реализовать приборные возможности, делает бессмысленным дальнейшие усилия по модернизации средств геодезических измерений. Выбор между точностью и оперативностью, неизбежный в связи с отсутствием эффективных методов учета влияния атмосферы, в стремительном современном мире,

как правило, делается в пользу оперативности. В конечном итоге это приводит к прямо противоположным результатам. Геодезические задачи, которые при использовании современного инструментария можно решать в едином комплексе (например – все работы по геодезическому обеспечению строительства и эксплуатации зданий и сооружений, в первую очередь – уникальных), расчлениают на несколько этапов. Отдельные этапы выполняют с использованием разных технологий и зачастую – разные исполнители.

К изменению требований к методам учета влияния ПСА привела и другая особенность современного этапа в развитии геодезического производства. Широкое использование универсальных электронных тахеометров, сочетающих в себе угломерный и дальномерный инструменты, ставит перед исследователями совершенно новую задачу разработки *универсального* средства решения проблемы.

**Цель выполненных исследований** состояла в *разработке теоретической концепции и практической технологии эффективного учета влияния ПСА на угловые и линейные геодезические измерения*. По мнению автора, эффективное решение проблемы состоит в комплексном использовании *измерений* параметров атмосферы и *моделирования* их пространственной изменчивости. Полный отказ от измерений в свете значительной изменчивости атмосферы недопустим. Для обеспечения оперативности объем измерений следует сократить, восполнив недостаток измерений моделированием.

**Задачи выполненных исследований:**

- 1) разработка геодезической модели ПСА;
- 2) разработка методов и средств определения переменных параметров геодезической модели;
- 3) разработка технологии практического применения *комплексной концепции* эффективного учета влияния ПСА.

Первые две задачи реализуют концепцию эффективного учета влияния ПСА на геодезические измерения. Решение третьей задачи обеспечивает выход комплексной концепции в геодезическое производство.

**Объект** исследования – влияние приземного слоя атмосферы на точность геодезических измерений. **Предмет** исследования – концепция эффективного учета влияния ПСА и реализующие ее технологические решения: пространственная модель ПСА, методы и средства определения параметров ПСА, технология практического применения.

**Методы исследований, достоверность и обоснованность результатов.**

Концепция эффективного учета влияния ПСА сформулирована на основании анализа достоинств и ограничений существующих методов учета влияния ПСА. Выполненные автором аналитические, теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать базовые теоретические принципы геодезической модели ПСА, разработать ее математический аппарат. Эксперименты, состоящие в моделировании пространственного распределения параметров атмосферы и анализе полученных результатов, подтвердили обоснованность основных теоретических положений, адекватность геодезической модели фактическому состоянию атмосферы; они позволили скорректировать рабочие уравнения. Технология практического применения использована для учета влияния атмосферы на результаты угловых и линейных измерений на наземных трассах, для моделирования показателя преломления на наклонных трассах. Результаты моделирования сравнивались с непосредственно измеренными значениями и результатами, полученными другими методами. Все новые конструктивные элементы углового рефрактометра прошли соответствующую экспериментальную апробацию, подтверждающую его точность, надежность и стабильность. Геодезический градиентометр был реализован в виде опытного образца, прошедшего апробацию в полевых условиях, полученные результаты подтвердили его работоспособность и эффективность для целей учета влияния ПСА в электронной тахеометрии.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Совокупное использование *измерений и моделирования* параметров ПСА обеспечивает повышение *точности и оперативности* учета влияния атмосферы на геодезические измерения.

2. *Дифференциальный принцип моделирования*, который заключается в моделировании пространственной изменчивости параметров атмосферы, позволяет избежать потерь точности в процессе моделирования.
3. Изменение факторов, влияющих на распределение показателя преломления в пространстве, служит критерием изменения состояния атмосферы, что позволяет свести дифференциальное моделирование *к учету изменения влияющих факторов*.
4. *В приземном слое атмосферы* влияющих факторов всего два – тип подстилающей поверхности и высота над ней, что делает реальным корректный учет их изменчивости. Характер факторов, подлежащих учету, обеспечивает возможность пространственного моделирования.
5. Измерения, выполненные на трех уровнях, позволяют надежно определять параметры *вертикального распределения* даже при отсутствии информации о механизме передачи тепла и влаги в верхние слои атмосферы.
6. Использование измерений над двумя крайними по своим микроклиматическим свойствам поверхностями обеспечивает контроль результатов *горизонтального моделирования*.

#### **Наиболее существенные результаты исследований:**

- разработана ***принципиально новая концепция*** учета влияния приземного слоя атмосферы (ПСА) на геодезические измерения, заключающаяся в использовании выявленных закономерностей ПСА для измерения его параметров и моделирования их вариаций в пространстве;
- разработан ***технологический комплекс***, реализующий предложенную концепцию и включающий в себя:
  - а) геодезическую модель атмосферы, учитывающую пространственную изменчивость ПСА;

- б) методы и средства определения переменных параметров модели, обеспечивающие оптимизацию по точности и оперативности;
- в) технологию практического применения.

**Новизна научных результатов:**

- разработанная концепция кардинально отличается от известных решений возможностью эффективного учета пространственной изменчивости параметров ПСА и универсальностью (применимостью как к линейным, так и к угловым измерениям);
- разработанная в диссертации геодезическая модель не имеет аналогов и позволяет моделировать пространственные изменения показателя преломления – его горизонтального и вертикального градиентов;
- разработанные автором принципы эффективной организации полевых измерений атмосферных параметров предоставляют потребителю возможность выбора между метеорологическим и геодезическим способами определения параметров геодезической модели атмосферы; измерения выполняют всего в двух пунктах в районе работ на двух (трех) уровнях, что обеспечивает контроль и позволяет учесть нелинейный характер изменения состояния атмосферы с высотой;
- предложенный способ учета влияния ПСА без знания высоты траектории исключает из дополнительных измерений трудоемкое определение высоты;
- при использовании разработанной автором методики профильного комплексирования все влияющие факторы объединяются в комплексы по характерному признаку (профилю), что позволяет учесть случайные изменения влияющих факторов в промежутке между измерениями;
- разработанная схема углового рефрактометра отличается включением атмосферной трассы в цепь отрицательной обратной связи между выходом измери-

тельной схемы и источником излучения для обеспечения стабильных результатов полевых измерений;

- предложенный и реализованный геодезический градиентометр позволяет интегрировать измерения параметров атмосферы в электронную тахеометрию;
- разработанная технология практического применения ориентирована на решение конкретных геодезических задач производственного и исследовательского характера.

**Теоретическая значимость работы** заключается в том, что предложенные и обоснованные автором принципы моделирования и измерения параметров ПСА обеспечивают развитие методов учета влияния атмосферы в новом направлении, основанном на моделировании пространственной изменчивости состояния атмосферы, и служат теоретической базой для получения оптимальных технологических решений.

**Практическая значимость работы.** Концепция эффективного учета влияния ПСА, реализованная в геодезической модели и комплексе методов и средств определения переменных параметров модели, позволяет использовать полученные результаты для эффективной коррекции угловых и линейных геодезических измерений на горизонтальных и наклонных трассах. Задачи, решаемые посредством точных угловых и линейных измерений, отличаются большим разнообразием. К таким задачам относятся:

- 1) создание специальных опорных сетей для целей геодезического обеспечения строительства и эксплуатации мостовых переходов, железных дорог, тоннелей, причальных сооружений и волнорезов;
- 2) геодезическое обеспечение планировки и строительства объектов гидромелиорации;
- 3) задачи геодезической метрологии – исследование методов и средств геодезических измерений на метрологических базисах и полигонах;



- 4) тригонометрическое нивелирование;
- 5) контроль за деформациями земной коры на геодинимических полигонах;
- 6) контроль за деформациями зданий и сооружений в процессе эксплуатации;
- 7) обеспечение рационального решения разного рода геодезических задач, в том числе на строительной площади;
- 8) обеспечение проектного положения лазерной плоскости;
- 9) контроль геометрических параметров крупногабаритных конструкций (судов, вращающихся печей и т.п.) в процессе строительства, монтажа, эксплуатации.

**Личный вклад автора.** Автором единолично разработаны концепция эффективного учета влияния ПСА на геодезические измерения и такие реализующие ее решения, как модель вертикального распределения метеоэлементов и показателя преломления в нижнем ПСА, модель вертикального распределения влажности в среднем и верхнем ПСА, модель горизонтальной изменчивости параметров ПСА с использованием относительных переходных коэффициентов, метеорологический способ определения параметров геодезической модели ПСА, принцип учета влияния ПСА без знания высоты траектории, геодезический градиентометр, технология использования методики профильного комплексирования в геодезических целях, технология практического применения при решении разного рода геодезических задач.

**Реализация результатов работы.** Технология практического применения использована при решении конкретных геодезических задач, в их числе: учет влияния вертикальной и горизонтальной рефракции на результаты угловых геодезических измерений, учет влияния ПСА на результаты линейных измерений на наземных и наклонных трассах, комплексный учет влияния ПСА в электронной тахеометрии.

**Апробация работы.** Основные результаты выполненных исследований докладывались на ряде научно-технических конференций, таких как: 61-я юбилейная научно-техническая конференция студентов и молодых ученых

МИИГАиК в 2006 году, 5-ая Международная научно-техническая конференция «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (16-17 мая 2006 года, Москва, ГНУ ВИЭСХ), 8-ая научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов» (МИИТ, 1-2 ноября 2008 года), Международная научно-техническая конференция "Геодезия, картография и кадастр – XXI век", посвященная 230-летию МИИГАиК (25-27 мая 2009 года).

**Публикации.** Основные теоретические положения и практические результаты исследований по теме диссертации опубликованы автором в 25 печатных работах, в их числе 13 единолично написанных статей, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК, две депонированные монографии, написанные в соавторстве, два авторских свидетельства СССР и один патент РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, четыре раздела основной части, заключение, список использованных источников, приложения А-Ж. Диссертация изложена на 318 страницах машинописного текста, включает 42 рисунка и 28 таблиц. Список использованной литературы содержит 194 наименования, в том числе 50 на иностранных языках.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко обоснована актуальность работы, сформулированы концепция эффективного учета влияния ПСА на угловые и линейные геодезические измерения, цель и задачи исследований, изложены требования к геодезической модели ПСА, обеспечивающие ее эффективность и универсальность.

**В первом разделе** выполнена количественная и качественная оценка степени влияния ПСА на результаты традиционных – угловых и линейных – и современных методов геодезических измерений.

Атмосфера искажает результаты геодезических измерений при наличии *изменчивости* (градиента) показателя преломления в направлении распро-

странения электромагнитного излучения. Связь показателя преломления с параметрами физического состояния воздуха описывают эмпирические формулы. Кроме широко известных геодезистам зависимостей автор использует редуцированную формулу Эдлена, которая обеспечивает вычисление показателя преломления  $n$  в оптическом диапазоне с точностью до  $10^{-8}$  и отделяет влияние водяных паров

$$n - 1 = \frac{(n_0 - 1)ap}{1 + bt} - e(c - d\tilde{\nu}^2) \cdot 10^{-8}, \quad (1)$$

где  $n_0$  – показатель преломления стандартного воздуха;  $a = 0,00104126$ ;  $b = 0,003671$ ;  $c = 4,292$ ;  $d = 0,0343$ ;  $t$ ,  $p$  и  $e$  – температура, давление и влажность в  $^{\circ}\text{C}$  и гПа;  $\tilde{\nu}$  – волновое число в вакууме в  $\text{мкм}^{-1}$ . Представив формулу (1) в частных производных, получим зависимость, характеризующую связь градиента показателя преломления с градиентами метеоэлементов

$$\frac{dn}{dy} = -\frac{(n_0 - 1)abp}{(1 + bt)^2} \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{(n_0 - 1)a}{1 + bt} \frac{\partial p}{\partial y} - (c - d\tilde{\nu}^2) 10^{-8} \frac{\partial e}{\partial y}. \quad (2)$$

Для определения *расстояния* с относительной погрешностью  $10^{-6}$ , показатель преломления необходимо знать с точностью 1 N-ед. К такому изменению показателя преломления в оптическом диапазоне приводит изменение температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ , а в радиодиапазоне – изменение влажности на  $0,1$  гПа. В ПСА изменения метеоэлементов такого порядка могут наблюдаться на линии длиной сотни, а иногда и десятки метров.

Задавшись реальными значениями горизонтальных и вертикальных градиентов метеоэлементов, можно оценить степень влияния *угловой* рефракции на точность угловых измерений. Наличие горизонтального градиента температуры  $0,05^{\circ}\text{C}/\text{м}$  на трассе протяженностью  $1$  км приведет к погрешности определения горизонтального угла, равной  $5''$ . Вертикальные градиенты метеоэлементов могут на порядки превосходить их значения в горизонтальной плоскости. На трассе протяженностью  $1$  км вертикальная рефракция нередко достигает десятков угловых секунд, погрешность определения превышения в подобных случаях составит десятки сантиметров.

Современные методы и средства геодезических измерений отличаются универсальным характером, высокой точностью, оперативностью. Однако эффект от внедрения новых методов может быть сведен к нулю необходимостью учета влияния атмосферы.

Универсальность *электронных тахеометров* создает большие в сравнении с традиционными геодезическими измерениями сложности в учете влияния атмосферы. Механизм влияния неоднородности приземного слоя атмосферы на результаты измерений, выполненных электронным тахеометром, включает двоякое действие: атмосфера искажает результаты как угловых, так и линейных измерений. Погрешности, вносимые ПСА, сравнимы с приборной погрешностью современных электронных тахеометров или превосходят ее, что повышает требования к точности определения поправок за влияние атмосферы. В тех случаях, когда необходим учет влияния ПСА, не может быть реализовано одно из главных достоинств электронного тахеометра, состоящее в возможности обработки результатов измерений в полевых условиях – помимо удовлетворительной точности современные методы учета влияния атмосферы должны отвечать требованию оперативности.

Электронный способ измерения расстояний, положенный в основу *спутниковых* определений, предполагает знание результирующей скорости распространения радиосигнала вдоль дистанции. Непостоянная плотность тропосферы приводит к возникновению изменчивой тропосферной задержки, включающей влияние ПСА. При величине среднеинтегрального индекса преломления в нижнем километровом слое равной 300 N-единицам, задержка в ПСА составит около (30-40) см.

На основании выполненного анализа сделан закономерный вывод о том, что приземный слой атмосферы в той или иной степени искажает результаты всех геодезических измерений. При высоких требованиях к точности учет влияния ПСА обязателен.

Выполненный далее анализ основных закономерностей пространственного и временного распределения показателя преломления и метеоэлементов по-

зволил не только оценить сложность поставленной задачи, но и наметить пути ее решения.

Следует различать макромасштабные и микромасштабные (местные) поля параметров атмосферы. Влияние *макромасштабных* метеорологических полей на результаты геодезических измерений, как правило, на порядок меньше, чем местных, имеет систематический характер и легче поддается учету. *Микромасштабные* поля формируются под воздействием местных неоднородностей подстилающей поверхности, выражены в нижнем слое толщиной около одного километра. Именно этот слой назван автором приземным слоем атмосферы. Более детальное деление атмосферы на слои, принятое у метеорологов, с точки зрения потребностей геодезии не представляется целесообразным.

При всем кажущемся разнообразии факторов формирования местных полей показателя преломления и метеоэлементов все они могут быть объединены одним общим понятием – типом подстилающей поверхности (ПП). Тип ПП характеризуется: 1) химическим составом почвы; 2) ее физическим состоянием (плотностью, температурой, влажностью); 3) шероховатостью; 4) растительным покровом (цветом, высотой, плотностью); 5) рельефом.

Совокупное влияние этих факторов формирует *микроклимат*, под которым договоримся понимать климат ПСА. Для эффективного учета влияния неоднородности приземного слоя атмосферы необходимо знать распределение метеоэлементов и их градиентов вдоль линии визирования на высоте визирного луча. Таким образом, геодезистов интересует не столько микроклимат, сколько его изменчивость вдоль траектории на высоте визирного луча – «*дифференциальный микроклимат*».

Исходя из данного выше определения дифференциального микроклимата, к факторам его формирования помимо *типа подстилающей поверхности* следует отнести *высоту* визирного луча над ней. Изменение одного из этих факторов или их комплекса вдоль визирной линии приводит к изменению пространственного распределения метеоэлементов и их градиентов.

Подводя итог выполненному в первом разделе анализу, имеет смысл отметить следующее: несмотря на то, что местные поля параметров атмосферы отличается значительная временная и пространственная изменчивость, набор факторов, определяющих их формирование, ограничен и включает *тип подстилающей поверхности* и *высоту* над ней. С учетом изменения этих двух факторов можно смоделировать *изменение* параметров атмосферы в пределах микромасштабных (местных) метеорологических полей.

Во **втором разделе** диссертационной работы выполнен анализ существующего положения в решении проблемы учета влияния ПСА на геодезические измерения. Исследования в этой области традиционно велись по двум направлениям, которые можно назвать «методическим» и «аппаратурным». Как названия направлений, так и само причисление того или метода к соответствующему направлению часто являются условными. Однако такое разделение методов и приемов на две группы позволяет подойти к тем ограничениям, которые неизбежно возникают в случае предпочтения того или другого подхода.

К *методическому* направлению автор отнесла те методы и приемы, которые опираются на знание и прогнозирование метеорологических элементов слоя воздуха, в котором осуществляются геодезические измерения. *Аппаратурное* направление включает методы прямых и косвенных измерений среднеинтегральных для трассы значений показателя преломления и его градиента.

*Методические приемы учета* влияния атмосферы предполагают определение поправок в результаты геодезических измерений. Определение поправок за влияние атмосферы по результатам метеоизмерений в конечных точках траектории приводит к возникновению ошибок осреднения, величина которых зависит от степени неоднородности атмосферы вдоль визирной линии. Практически все пути уменьшения погрешности осреднения при всем своем разнообразии сводятся к решению уравнений вида

$$\bar{r} = -\frac{\rho''}{D} \sum_{i=1}^m g_i l_i L_i \quad \text{и} \quad \bar{n} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^m n_i l_i, \quad (3)$$

где  $\bar{r}$  и  $\bar{n}$  – средние весовые для траектории значения угла рефракции и показателя преломления;  $D$  – длина траектории,  $m$  – число участков траектории, для которых значения показателя преломления и его градиента считают постоянными;  $n_i$  и  $g_i$  – осредненные для  $i$ -ого участка траектории значения показателя преломления и его градиента;  $l_i$  и  $L_i$  – длина  $i$ -ого участка траектории и расстояние от точки, в которой расположен объект наблюдений, до середины  $i$ -ого участка.

При использовании формул (3) метеоэлементы, помимо конечных пунктов траектории, необходимо определять в  $(m-2)$  пунктах вдоль нее. Дополнительные измерения снижают оперативность учета влияния атмосферы. Повышение точности зависит от погрешности метеоизмерений и правильности выбора места расположения дополнительных метеорологических пунктов.

Обоснованный принцип разбиения трассы на участки при учете боковой рефракции предложил Л.С. Юношев. Каждый участок траектории соответствует блоку атмосферы, названному Л.С. Юношевым квазистационарным. Квазистационарный блок боковой рефракции света представляет собой участок атмосферы вдоль луча, на котором вследствие влияния внешних условий возникают устойчивые горизонтальные градиенты температуры и влажности воздуха. Подобный подход к разбиению на участки может быть реализован и при учете вертикальной рефракции.

Остается решить вопрос о тех критериях, которые позволяют выделить участок траектории луча как соответствующий отдельному квазистационарному блоку. Учесть полный набор критериев – невозможно. Однако если среди множества влияющих факторов выделить тип подстилающей поверхности в качестве основного критерия разбиения на участки и выбора места расположения дополнительных метеопунктов, можно в значительной мере повысить эффективность учета влияния ПСА. Этот принцип и был использован автором при разработке геодезической модели ПСА.

Сократить число дополнительных метеорологических измерений или вовсе отказаться от них позволяют *модели* атмосферы, описывающие распределение

температуры, давления и влажности вдоль измеряемой дистанции. К сожалению, ни одна из существующих моделей не позволяет учесть все три составляющие изменчивости параметров атмосферы: две пространственные и одну временную.

Гораздо бóльших успехов добились исследователи, работающие над *методами ослабления* влияния атмосферы. При таком подходе геодезические измерения организуют таким образом, чтобы исключить или значительно ослабить влияние атмосферы на их точность. Многочисленные исследования по проблеме вертикальной рефракции позволили выработать рекомендации по выбору оптимальных времени наблюдений и геометрии расположения трассы.

С целью ослабления влияния боковой рефракции используют метод выполнения измерений на момент вертикальной изотермии воздуха, предложенный Н.В.Яковлевым и дополненный другими исследователями. К его ограничениям следует отнести снижение оперативности геодезических измерений, которые привязаны во времени к непродолжительным периодам утренней и вечерней изотермии воздуха. Точность метода измерений на момент изотермии зависит от точности определения момента вертикальной изотермии и степени согласованности во времени и пространстве вертикальной и горизонтальной изотермии воздуха.

Для ослабления влияния атмосферы на результаты спутниковых измерений в геодезической практике используют способ *относительных* измерений, при котором фазовым методом определяют приращения координат между базовой  $B$  и определяемой  $O$  станциями. ПСА искажает результаты относительных спутниковых измерений в случае неидентичности условий прохождения радиосигнала от спутника к спутниковым приемникам в этом слое атмосферы. Отличие для двух траекторий средних температуры и влажности приземного слоя на  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $3\text{ гПа}$  приведет к отличию  $\Delta_{N_{ПСА}}$  индексов преломления на  $13,2\text{ N-ед.}$ , а псевдодальностей (при высоте спутника  $\nu = 30^{\circ}$ ) – на  $26\text{ мм}$ :

$$\Delta_D = \left( \Delta_{N_{ПСА}} / \sin \nu \right) (\text{мм}).$$



С учетом небольшого расстояния между спутниковыми приемниками неидентичность атмосферных условий возникает вследствие отличий в двух факторах формирования местных полей показателя преломления. При формировании вторых фазовых разностей в ряде случаев влияние разного характера подстилающих поверхностей компенсируется (рис. 1 (а)). На рис. 1 (б) представлен такой вариант взаимного расположения подстилающих поверхностей и траекторий, при котором влияние отличий в характере подстилающих поверхностей удваивается.

Влияние разной высоты спутниковых приемников при формировании вторых фазовых разностей компенсируется только в случае его систематического характера. Согласно выполненным расчетам, влияние ПСА на точность относительных спутниковых определений сравнимо с точностью фазовых измерений и подлежит всестороннему изучению.

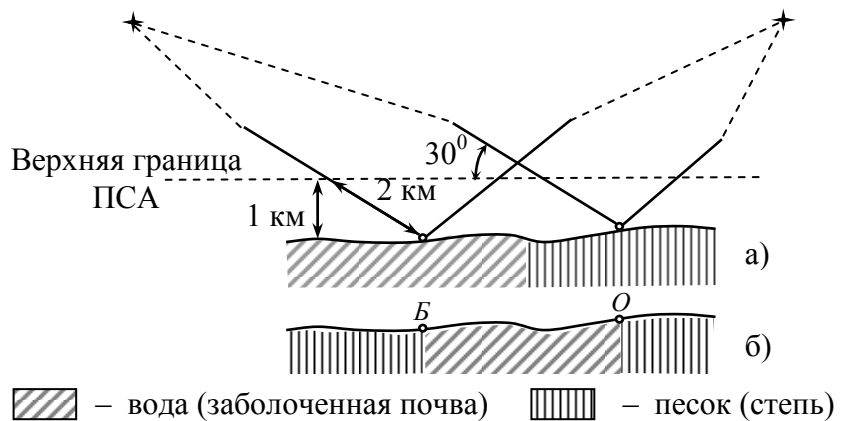


Рисунок 1 – Расположение подстилающих поверхностей и направлений

Далее в работе выполнен анализ методов *аппаратурного* направления, которые позволяют тем или иным способом измерить *результатирующие* для трассы значения параметров атмосферы и свободны от основного недостатка методических приемов, который состоит в точечном характере метеорологических измерений.

Среди аппаратурных методов учета влияния вертикальной рефракции наиболее точным и бесспорным является *геодезический* способ определения коэффициента рефракции. Коэффициент рефракции вычисляют по разности измеренного зенитного расстояния и его точного значения, определенного по результатам геометрического нивелирования. Зенитные расстояния предварительно исправляют за влияние уклонов отвесных линий. В силу трудоемкости реализации и высокой точности этот подход используется при исследова-

тельских работах в качестве эталонного способа определения вертикальной рефракции. Применение геодезического способа в производстве предполагает, что коэффициент рефракции, определенный для одного направления в районе работ, используется на других направлениях, что приводит к возникновению погрешности за отличие коэффициента рефракции на эталонном и рабочем направлениях. Ни один из предложенных методов уменьшения этого вида погрешностей не позволяет учесть все три составляющие изменчивости коэффициента рефракции – вертикальную, горизонтальную и временную.

М.Т. Прилепиным разработан *дисперсионный* метод измерения среднеинтегрального показателя преломления. К сожалению, основанные на дисперсионном методе линейные рефрактометры, позволяющие с достаточной точностью определять среднеинтегральный показатель преломления, не находят широкого применения в геодезической практике вследствие их высокой стоимости и громоздкости аппаратуры.

Разработка аппаратуры, реализующей *дисперсионный* метод измерения *угловой* рефракции, сталкивается с рядом объективных трудностей. Здесь имеет смысл выделить высокие требования к точности измерения угловой дисперсионной разности. Флуктуации, имеющие место в реальной атмосфере, приводят к флуктуациям интенсивности сигнала, флуктуациям угла его прихода, и являются основной причиной, по которой удобный в реализации, теоретически обоснованный, дисперсионный метод не дает в реальной атмосфере требуемую при геодезических измерениях точность.

Эта же причина заставила исследователей разрабатывать такие методы аппаратных измерений угловой рефракции, при которых флуктуации атмосферы, искажающие результаты дисперсионных определений, становятся объектом измерения. Все методы и устройства, реализующие такой подход, опираются на использование теории подобия Мони́на-Обухова и позволяют определить лишь одну составляющую вертикальной рефракции – турбулентную.

Подводя итог выполненному анализу, отметим, что ни один из существующих методов учета влияния ПСА не отвечает одновременно требованиям точности и оперативности, т.е. не может считаться эффективным. Рациональное

решение проблемы не в предпочтении того или иного подхода, а в их *комплексном использовании*. Результаты измерений параметров атмосферы дают представление о ее фактическом состоянии. При высоких требованиях к точности полный отказ от проведения полевых измерений недопустим. С целью повышения оперативности измерения следует ограничить одним-двумя исходными направлениями. При переходе к рабочим направлениям необходимо учесть изменение состояния атмосферы с помощью модели. Обеспечить высокую точность может только пространственная модель, учитывающая изменчивость атмосферы в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Изложенные выше положения составляют суть *комплексной концепции эффективного учета влияния ПСА на геодезические измерения*. Комплексная концепция реализована в двух взаимодополняющих составляющих: геодезической модели ПСА и комплексе методов и средств определения переменных параметров модели, разработке которых посвящен **третий раздел** работы.

**Геодезическая модель ПСА.** При разработке геодезической модели ПСА использован дифференциальный принцип моделирования пространственной изменчивости параметров атмосферы в пределах местных полей показателя преломления.

В ограниченном по площади районе изменение величины показателя преломления и его градиента зависит от высоты над подстилающей поверхностью и ее типа (качества). Качество подстилающей поверхности характеризуют химический состав, физическое состояние, растительный покров и т.п. Используя этот набор характеристик, все трассы можно разбить на участки, для которых усреднен результат влияния метеорологических факторов. При вычислении результирующей для трассы характеристики атмосферы помимо высоты над подстилающей поверхностью и ее типа следует учитывать весовое участие данного участка в формировании конечного результата. Таким образом был сформирован круг параметров, которые должна включать разрабатываемая модель атмосферы, и ограничена область ее применения: по вертикали – приземным слоем воздуха, по горизонтали – размерами местных метеорологических полей (десятки километ-

ров). Все перечисленные параметры включены в основные уравнения геодезической модели

$$F_A = \sum_{i=1}^m E_i(z) A_i B_i C_i \quad (4) \quad \text{и} \quad F_A = \sum_{i=1}^m E_i(z) A_i B_i \quad (5)$$

где  $F_A$  – функция результирующего влияния атмосферы;  $E_i$  – осредненное для  $i$ -ого участка значение характеристики атмосферы  $E$ ;  $z$  – средняя высота траектории луча на  $i$ -ом участке;  $A_i$  – представительство (вес) качества  $i$ -ого участка трассы в формировании конечного результата;  $B_i$  – представительство количества, размеров  $i$ -ого участка в формировании конечного результата;  $C_i$  – представительство положения  $i$ -ого участка вдоль трассы.

В случае *угловых* измерений (уравнение (4)) функция  $E_i(z)$  представляет собой градиенты метеоэлементов и показателя преломления. При *линейных* измерениях (уравнение (5))  $F_A$  и  $E_i(z)$  – абсолютные значения метеоэлементов и показателя преломления. В отличие от формул (3) уравнения (4)-(5) содержат тот необходимый набор параметров, который формирует значение показателя преломления и его градиента, является критерием разбиения на участки и делает возможным редуцирование параметров атмосферы с одной трассы на другую.

Для описания *вертикального* распределения метеоэлементов и их градиентов автор предлагает использовать формулы вида

$$E_z = E_0 + \sum_{j=1}^J \Delta z_j \cdot a \cdot z_j^b, \quad \left( grad_{вер} E \right)_z = a \cdot z^b, \quad (6)$$

где  $E_z$  – значение метеорологического элемента на расчетной высоте;  $E_0$  – значение метеоэлемента на исходной высоте  $z_0$ , равной 1 м;  $a$  – градиент метеоэлемента на исходной высоте 1 м;  $b$  – коэффициент обмена, характеризующий характер теплообмена и динамику расчетного слоя воздуха;  $\left( grad_{вер} E \right)_z$  – градиент метеоэлемента на расчетной высоте  $z$ .

Параметр  $z^b$  в формулах (6) – безразмерный коэффициент, который позволяет учесть нелинейный характер вертикального распределения характеристик среды. Второе слагаемое в первой зависимости (6) представляет собой из-

менение характеристики  $E$  при переходе от уровня  $z_0$  к уровню  $z$ . Весь интервал  $(z - z_0)$  разбит на  $J$  слоев толщиной  $\Delta z_j$ , для которых значения градиента  $E$  считают постоянными. Величина  $\Delta z_j$  зависит от высоты над подстилающей поверхностью, т.е. от номера слоя  $j$ , и принята равной 0,5 м для нижних двух метров, 1 м – на высотах 2-10 м, 10 м – для высот от 10 до 50 м, 50 м – на высотах 50-300 м и 100 м – выше этого уровня. Градация выполнена на основании требований к точности определения метеоэлементов и возможной интенсивности их изменения с высотой (Приложение А).  $z_j$  – середина  $j$ -го слоя.

Вертикальную модель в ее исходной виде (6) предлагается использовать для построения вертикального профиля температуры и влажности воздуха. Зависимость давления от высоты носит несколько отличный от других метеоэлементов характер, максимально приближенный к линейному. Нормальный вертикальный градиент давления в ПСА, используемый в моделях стандартной атмосферы, равен (-0,13) гПа/м. Однако помимо нормальной составляющей вертикальный градиент давления включает аномальную часть. В предположении, что аномальная составляющая вертикального градиента давления подчиняется зависимости (6), формулы для моделирования вертикального распределения давления примут вид

$$\left. \begin{aligned} p_z &= p_0 + \sum_{j=1}^J \Delta z_j \cdot \left[ \left[ (grad_{\text{вер}} p)_0 + 0,13 \right] \cdot z_j^b - 0,13 \right], \\ (grad_{\text{вер}} p)_z &= \left[ (grad_{\text{вер}} p)_0 + 0,13 \right] \cdot z^b - 0,13, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\left[ (grad_{\text{вер}} p)_0 + 0,13 \right]$  – аномальная часть градиента давления.

В применении к геодезическим целям необходимости в разделении метеоэлементов нет. В ряде случаев редуцировать приходится функции их результирующего влияния – показатель преломления, его градиент. Показатель преломления  $n_z$  и его градиент  $(grad_{\text{вер}} n)_z$  на расчетной высоте  $z$  связаны с их значениями  $n_0$  и  $(grad_{\text{вер}} n)_0$  на высоте 1 м соотношениями вида

$$n_z = n_0 + \sum_{j=1}^J \Delta z_j \cdot \left[ \left[ (\text{grad}_{\text{веп}} n)_0 + 0,038 \cdot 10^{-6} \right] \cdot z_j^b - 0,038 \cdot 10^{-6} \right], \quad (8)$$

$$(\text{grad}_{\text{веп}} n)_z = \left[ (\text{grad}_{\text{веп}} n)_0 + 0,038 \cdot 10^{-6} \right] \cdot z^b - 0,038 \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где  $(-0,038 \cdot 10^{-6})$  – вклад нормального градиента давления в результирующее значение градиента показателя преломления.

Геодезическая модель *вертикального* распределения содержит три параметра: значения характеристики атмосферы и ее градиента на высоте 1 м и коэффициент обмена. Все три параметра предлагается определять по градиентным (на нескольких уровнях) геодезическим или метеорологическим измерениям. При таком подходе отпадает необходимость задаваться предположением о механизме передачи тепла в верхние слои атмосферы и характере изменения параметров атмосферы с высотой.

При использовании *метеорологического способа* температуру и влажность измеряют на трех высотах –  $z_1$  (равной  $z_0$ ),  $z_2$  и  $z_3$

$$b_E = \frac{\ln \left( \frac{E_{z_2} - E_0}{E_{z_3} - E_{z_2}} \right) - \ln \left( \frac{z_2 - z_0}{z_3 - z_2} \right)}{\ln \left[ (z_2 + z_0) / (z_3 + z_2) \right]}; \quad (\text{grad}_{\text{веп}} E)_0 = \frac{E_{z_2} - E_0}{(z_2 - z_0) \left[ (z_2 + z_0) / 2 \right]^b}. \quad (10)$$

Использование коэффициента обмена, определенного по градиентным измерениям температуры для редуцирования влажности на расчетную высоту не всегда оправдано. В Приложении Б приведены метеоданные и результаты их обработки, согласно которым значения коэффициента обмена, вычисленные по градиентным измерениям температуры и влажности, хорошо согласованы во второй половине дня и сильно разнятся в утренние часы. Этот факт объясняется различием в механизме передачи тепла и влаги в верхние слои воздуха в утренние часы. Малая величина аномального градиента давления позволяет пренебречь возможным отличием в значениях коэффициента обмена для температуры и аномального градиента давления. Давление достаточно измерить на двух высотах.

Метеорологические измерения должны охватывать весь рабочий слой воздуха, что нетрудно организовать на горизонтальных приземных трассах. Для оп-

ределения коэффициента обмена  $b$  в геодезических целях вплоть до высоты  $z$ , равной 100 м, предложено устройство с механизмом поднятия измерителей на нужную высоту шаром, наполненным легким газом (по аналогии с метеорологическим радиозондированием). В ближнем приземном слое для градиентных измерений метеоэлементов автор предлагает использовать цифровой геодезический градиентометр. Устройство представляет собой телескопическую штангу с установленными на нескольких уровнях электронными метеодатчиками. Экспериментальные исследования, организованные автором в июле-сентябре 2009 года, показали, что геодезический градиентометр позволяет эффективно учесть влияние атмосферы на точность линейных измерений и значительно ослабить влияние рефракции на результаты измерения вертикальных углов.

Модель вертикального распределения и метеорологический способ определения ее параметров опробованы автором при редуцировании влажности и температуры воздуха.

В первом случае использованы результаты градиентных измерений температуры и влажности на высотах 1, 3 и 6 м аспирационным психрометром Ассмана. Измерения выполнялись в разных погодных условиях в разное время дня над разными подстилающими поверхностями в июне-сентябре 1998 г. Средняя квадратическая ошибка определения парциального давления водяного пара составила 0,5 гПа.

Во втором случае автор использовала данные температурных измерений на Высотной метеорологической мачте в Обнинске. Средняя квадратическая ошибка редуцирования температуры с высоты 73 м на высоту 121 м составила 0,24 °С, что соответствует ошибке определения показателя преломления в оптическом диапазоне, равной  $2,4 \cdot 10^{-7}$ . При редуцировании температуры с высоты 8 м на высоту 121 м средняя квадратическая ошибка несколько больше – 0,35 °С.

Результаты выполненных исследований подтвердили адекватность геодезической модели фактическому распределению метеоэлементов с высотой и возможность использования метеорологического способа в случае *линейных* геодезических измерений.

При использовании *геодезического* способа параметры вертикальной модели определяют по углу рефракции на уровне  $z_1$  и его приращению с высотой  $\delta r$ . С учетом (9) формула (3) для случая однородной подстилающей поверхности примет вид:

$$r = -\frac{\rho'' D}{2} \left[ (g_{\text{вер}})_0 + 0,038 \cdot 10^{-6} \right] z^b + \frac{\rho'' D}{2} 0,038 \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Формулы для вычисления коэффициента обмена и вертикального градиента показателя преломления получим из решения системы из двух уравнений вида (11)

$$b = \frac{\delta r}{r_1^{\text{ан}} (\Delta z / z_1)}; \quad (g_{\text{вер}})_0^{\text{ан}} = -\frac{2r_1^{\text{ан}}}{\rho'' D z_1^b}, \quad (12)$$

где  $r_1^{\text{ан}} = r_1 - \frac{\rho'' D}{2} 0,038 \cdot 10^{-6}$  и  $(g_{\text{вер}})_0^{\text{ан}} = (g_{\text{вер}})_0 + 0,038 \cdot 10^{-6}$  – угол рефракции и градиент показателя преломления на высоте  $z_1$ , исправленные за постоянную часть градиента давления.

Приращение рефракции определяют по углам рефракции, измеренным аппаратурными методами на двух уровнях  $z_1$  и  $z_2 = z_1 + \Delta z$ , или измеряют непосредственно, описанным в тексте диссертации устройством.

Для полновесной апробации геодезического способа определения параметров вертикальной модели использованы результаты полевых измерений, выполненных на экспериментальных полигонах «Чардым» и «Усовка» (рис. 2).

В *Чардыме* экспериментальные исследования (полевые измерения и обработка их результатов) выполнены в период с 1988 по 2008 год. Полевые измерения включали: измерения горизонтальных углов и зенитных расстояний теодолитами Т2, ТТ2/6, ОТ-02М; выполнение геометрического нивелирования II класса (геометрическим нивелированием связаны все пункты на правом берегу Волги), при котором на противоположный берег отметка передавалась по урезу воды с учетом характерных особенностей изменения уровня воды в Волгоградском водохранилище; метеорологические измерения. Дополнительно были определены уклонения отвесных линий по каж-



дому направлению. Основные характеристики направлений приведены в таблице 1.

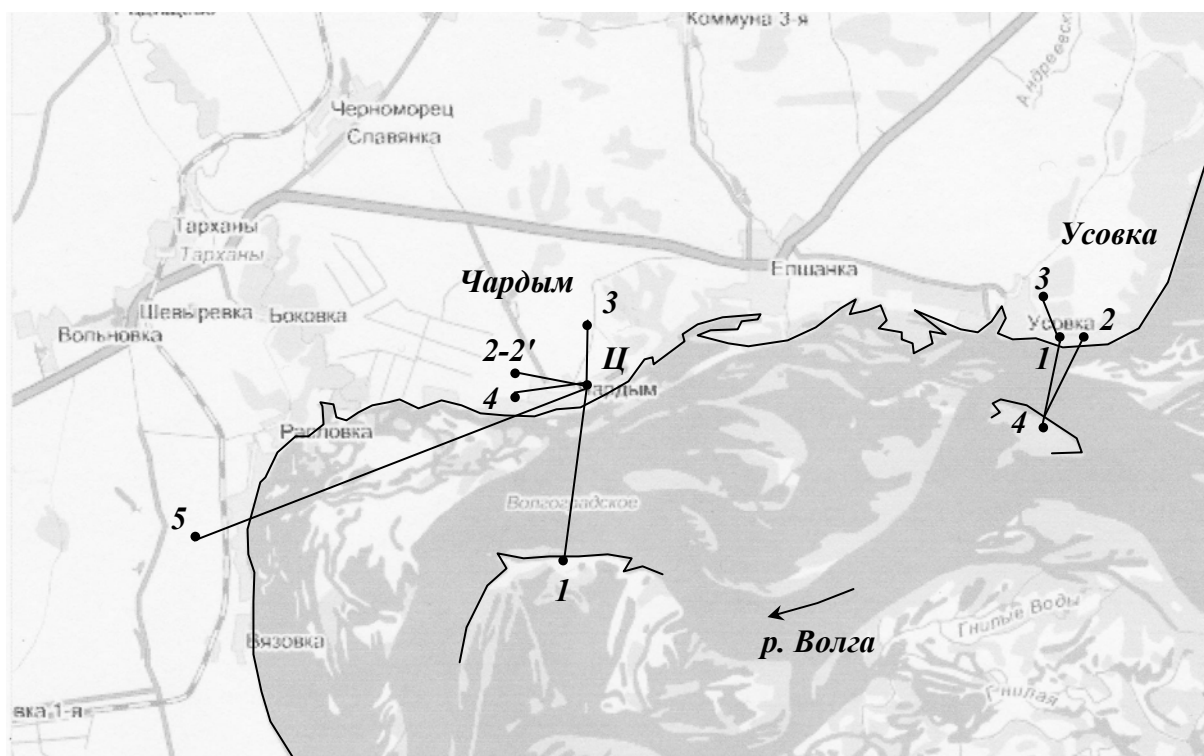


Рисунок 2

Таблица 1 – Основные характеристики рабочих направлений (Чардым)

Направление	Тип поверхности	Длина трассы (участка), м	Средняя высота, м
Ц-1	Степь, вода	200, 3000	12, 13
Ц-2	Степь	1292	2,68
Ц-2'	Степь	1292	3,92
Ц-3	Степь	1301	11,6
Ц-4	Степь	1300	4
Ц-5	Степь, вода, степь	400, 8000, 700	10, 49, 45

Для повышения точности угловые измерения выполнялись многократно. Каждая серия наблюдений включала 4-10 измерений по каждому направлению. Наблюдения производились в течение 20-40 минут. Полученные результаты приводились к одному моменту времени. Использовался прием линейной аппроксимации. Для зенитных расстояний средняя квадратическая ошибка одного

измерения составила 2,4". Для взятых в обработку значений в зависимости от количества измерений ошибка колебалась в пределах (0,8-1,2)".

В Усовке полевые наблюдения были выполнены в июле-сентябре 2009 года и включали измерения зенитных расстояний и наклонных дальностей электронным тахеометром Nikon NPL 632; геометрическое нивелирование III класса; передачу отметки по урезу воды; метеорологические измерения с помощью геодезического градиентометра и погодной станции с установленными на трех уровнях дистанционными датчиками температуры и влажности. Тахеометрические измерения по каждому направлению выполнялись на 4-х уровнях, как минимум четырьмя приемами, что позволяло рассчитывать на определение зенитного расстояния с точностью около 1". Поправки за влияние уклонений отвесных линий не вводились в силу их малой величины. В таблице 2 кратко охарактеризованы рабочие направления полигона Усовка.

Таблица 2 – Основные характеристики рабочих направлений (Усовка)

Направление	Тип поверхности	Длина трассы, м	Высота траектории (нижний уровень), м
1-3	Асфальт <i>(проезжая часть с активным движением транспорта)</i>	727,92	1,8
1-4	Вода	1646,41	3,7
2-4	Вода	1648,73	8,7

С целью проверки работоспособности модели вертикального распределения на полигонах Чардым и Усовка выполнены исследования, которые состояли в редуцировании угла вертикальной рефракции с одних направлений на другие. Средняя квадратическая ошибка определения угла рефракции составила (0,9-1,7)".

В верхнем ПСА высотный ход метеоэлементов имеет свои особенности: он более стабилен и не столь изменчив, как у поверхности земли. Сказанное послужило основанием для использования параметров вертикального распределения, определенных по измерениям в ближнем приземном слое, только до высоты (150-200) м. Выше этого уровня для моделирования температуры предлагается использовать стандартный градиент температуры 0,65 °C/100 м. Для определения влажности – значения температуры, полученные описанным выше

способом, и графики (рис. 3), отображающие связь температуры воздуха с его абсолютной влажностью. График для сухого воздуха совпадает с осью абсцисс. Кривая 1 соответствует максимально возможному содержанию водяного пара в атмосфере при данной температуре. Для удобства интерполяции дополнительно проведен график, сглаживающий фактическое распределение влажности (данные радиозондирования атмосферы).

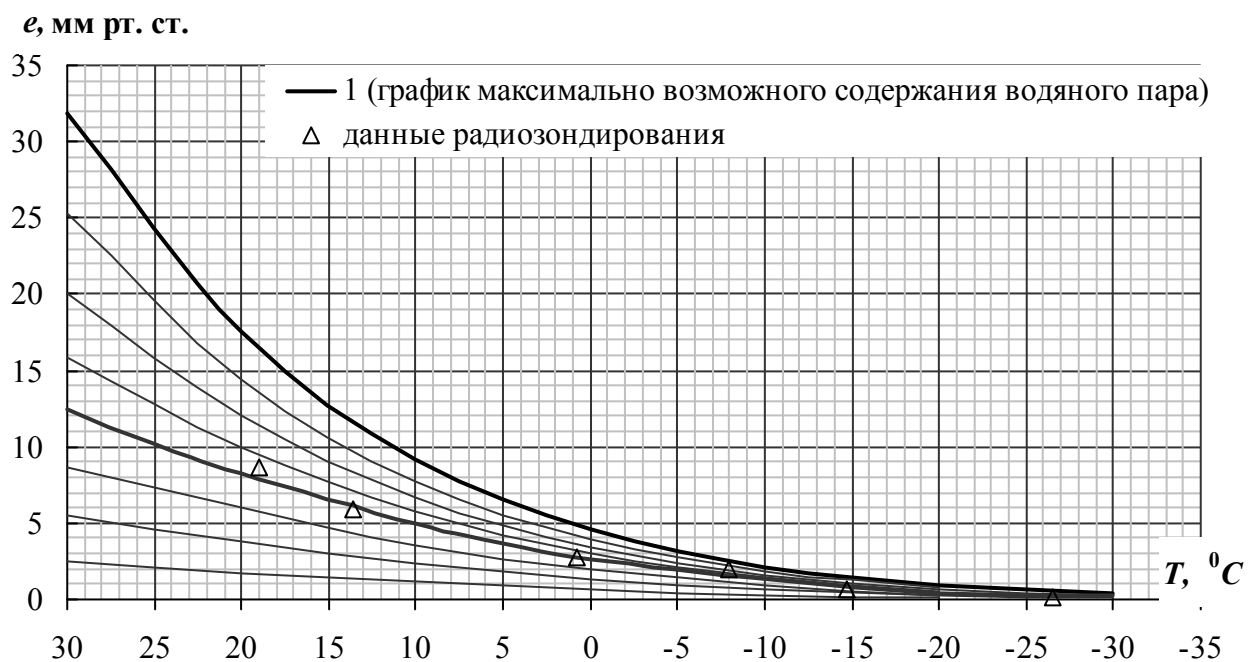


Рисунок 3 – График зависимости влажности воздуха от температуры

С целью апробации изложенного подхода выполнены экспериментальные исследования с использованием данных радиозондирования атмосферы на аэрологических станциях Москва (г. Долгопрудный) и Пенза. Профиль изменения температуры с высотой восстанавливался по ее значению на нижнем уровне и стандартному температурному градиенту. Соответствующие значения влажности снимались с рабочего графика. Оценка точности выполнялась по разностям непосредственно измеренных и вычисленных значений влажности. Средняя квадратическая ошибка определения парциального давления водяного пара составила 0,47 гПа, соответствующая погрешность определения расстояния в оптическом диапазоне равна 0,02 мм/км, в радиодиапазоне – 2 мм/км. Полученные результаты убедительно доказывают преимущество предложенного

способа моделирования вертикального распределения метеоэлементов в среднем и верхнем ПСА перед статистическими моделями, ни одна из которых не позволяет учесть наличие приземной инверсии.

Для моделирования *горизонтальной* изменчивости состояния атмосферы автор предлагает использовать переходные коэффициенты, которые:

- характеризуют изменение параметров атмосферы при смене типа подстилающей поверхности;
- постоянны для данного типа подстилающей поверхности, т.к. целиком зависят от ее физико-химических и теплофизических свойств;
- определяются по результатам предварительно выполненных исследований.

Здесь следует оговорить два возможных подхода к учету горизонтальной изменчивости состояния атмосферы – относительный и абсолютный. При использовании *абсолютного* подхода вертикальный градиент параметра атмосферы  $(grad_{вер} E)_1$ , измеренный над 1-ой (исходной) поверхностью, редуцируют на рабочую поверхность  $q$  с помощью переходных коэффициентов  $A_{1 \rightarrow q}$ :

$$(grad_{вер} E)_q = (grad_{вер} E)_1 A_{1 \rightarrow q}. \quad (13)$$

При использовании *относительного* подхода параметр атмосферы  $E_q$  для рабочей поверхности вычисляют по формуле вида

$$E_j = E_1 + \Delta E_{1 \rightarrow q} a_{1 \rightarrow q}. \quad (14)$$

Рациональный выбор способа редуцирования параметров ПСА с одной ПП на другую зависит от характера редуцируемых параметров и требований к точности и оперативности учета влияния атмосферы. С одной стороны, использование относительных переходных коэффициентов  $a_{1 \rightarrow q}$  предполагает бóльший объем полевых измерений: параметры атмосферы измеряют над двумя, крайними по своим микроклиматическим свойствам поверхностями. С другой стороны, относительный подход носит универсальный характер, т.к. может быть использован при редуцировании, как параметров ПСА, так и их градиен-

тов. Кроме того, приращение  $\Delta E_{1 \rightarrow Q}$  параметра ПСА при переходе от 1-й исходной поверхности к  $q$ -й обеспечивает контроль полученных результатов.

С целью апробации предложенного подхода к учету горизонтальной изменчивости состояния атмосферы были выполнены экспериментальные исследования, которые:

- 1) позволили составить список из  $Q$  типовых для данного региона поверхностей (число типовых поверхностей зависит от требований к точности и особенностей района работ и может колебаться в пределах 3-5, необходимости в более детальном разделении поверхностей на типы, как показали выполненные эксперименты, – нет);
- 2) подтвердили обоснованность использования переходных коэффициентов:
  - они действительно постоянны для данного типа подстилающей поверхности;
  - позволяют редуцировать параметры атмосферы с одной ПП на другую с достаточной для большинства практических задач точностью (средняя квадратическая ошибка определения температуры по формуле (14) составила  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- 3) позволили сделать следующий немаловажный вывод:
  - предварительные исследования по определению переходных коэффициентов желательны, но *не обязательны*. При небольшом объеме геодезических работ в данном районе от предварительных исследований можно вовсе отказаться или ограничить их однократными измерениями температуры на одинаковой высоте над представленными подстилающими поверхностями.

Изложенный подход к учету пространственной изменчивости параметров ПСА позволил наполнить конкретным содержанием элементы формул (3). Участки  $i$  траектории луча отличаются типом подстилающей поверхности. Количество участков разбиения  $m$  зависит от степени неоднородности подстилающей поверхности в направлении распространения излучения. Показатель преломления  $n_{ucx}$  и его градиент  $(g_{\text{вер}})_{ucx}$  определяются метеорологическим или геодезическим способом для двух исходных поверхностей. Значения этих характеристик  $n_i$  и  $(g_{\text{вер}})_i$ , осредненные для  $i$ -ого участка траектории, получают редуци-

рованием с исходных поверхностей с учетом типа подстилающей поверхности и средней высоты траектории на ее  $i$ -ом участке.

С учетом зависимостей (8), (9), (13), (14) формулы для вычисления значений показателя преломления и его градиента на  $i$ -ом участке траектории примут вид

$$\left. \begin{aligned} n_i &= n_{10} + \Delta n_{1 \rightarrow Q} a_{1 \rightarrow i} + \\ &+ \sum_{j=1}^J \Delta z_j \cdot \left[ \left[ \left( grad_{\text{вер}} n \right)_{10} + 0,038 \cdot 10^{-6} \right] \cdot A_{1 \rightarrow i} z_j^b - 0,038 \cdot 10^{-6} \right], \\ \left( g_{\text{вер}} \right)_i &= \left[ \left( grad_{\text{вер}} n \right)_{10} + 0,038 \cdot 10^{-6} \right] \cdot A_{1 \rightarrow i} z_i^b - 0,038 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Полученные с помощью зависимостей (15) показатель преломления и его градиент для  $i$ -ого участка используем при вычислении угла рефракции и результирующего показателя преломления по формулам (3).

Мероприятия по учету влияния приземного слоя атмосферы, реализующие комплексный подход, включают: 1) полевые измерения; 2) предварительные исследования; 3) дополнительные определения; 4) вычисления.

**Полевые измерения** необходимы для определения *переменных* параметров модели. Полевые измерения выполняют следующим образом:

- над крайними по своим микроклиматическим свойствам поверхностями (для учета горизонтальной изменчивости параметров атмосферы);
- на нескольких уровнях (для учета вертикальной изменчивости);
- в момент геодезических измерений или периодически (для учета временной изменчивости).

**Предварительные исследования** направлены на определение *постоянных* параметров модели – переходных коэффициентов  $A_{1 \rightarrow Q}$  и  $a_{1 \rightarrow Q}$ .

**Дополнительные определения** состоят в определении *геометрических характеристик* рабочих направлений.

Характер и объем полевых измерений, а также используемый математический аппарат, зависят от способа определения переменных параметров геодезической модели над исходными поверхностями. Автором разработаны схемы реализации комплексного подхода при использовании метеорологического и геоде-

зического способов определения параметров геодезической модели ПСА. Здесь кратко охарактеризуем их, остановившись на отличительных моментах.

При использовании метеорологического способа полевые *измерения* над  $l$ -ой поверхностью включают измерения: 1) температуры на трех уровнях; 2) влажности на трех уровнях; 3) давления на двух уровнях. Над  $Q$ -ой поверхностью (на одном уровне) измеряют: 1) температуру, 2) давление, 3) влажность.

На  $l$ -м *этапе вычислений* определяют коэффициент обмена и вертикальные градиенты метеоэлементов по формулам (10), абсолютные значения метеоэлементов по формулам (6)-(7). *Второй этап вычислений* состоит в определении по формулам (1)-(2) показателя преломления и его градиента для исходных поверхностей.

При использовании *геодезического* способа в районе выполнения геодезических работ над однородными поверхностями, соответствующими характеристикам для 1-ого и  $Q$ -го типов, организуют два исходных направления. Пространственные координаты конечных пунктов исходных направлений определяют с необходимой точностью. На 1-ом исходном направлении *измеряют*: 1) вертикальный угол на двух уровнях  $\nu_{1z_1}$  и  $\nu_{1z_2}$ ; 2) дальность  $D_{10}$ . На  $Q$ -ом исходном направлении *измеряют*: 1) дальность  $D_{q0}$ .

$l$  *этап вычислений* состоит в определении углов рефракции по разности точных  $\nu_{ист}$  (назовем их истинными) и приближенных (искаженных рефракцией) значений вертикальных углов

$$r_{1z_1} = \nu_{1z_1} - (\nu_{1z_1})_{ист}; \quad r_{1z_2} = \nu_{1z_2} - (\nu_{1z_2})_{ист}. \quad (16)$$

Значения углов рефракции исправляют за постоянную часть градиента давления

$$r_{1z_1}^{ан} = r_{1z_1} - \rho'' D_1 \cdot 0,019 \cdot 10^{-6}; \quad r_{1z_2}^{ан} = r_{1z_2} - \rho'' D_1 \cdot 0,019 \cdot 10^{-6}.$$

На  $2$ -м *этапе вычисляют* переменные параметры модели:

1) показатели преломления на высоте 1 м над исходными поверхностями

$$n_{10} = D_{10} n_0 / (D_{10})_{ист}; \quad n_{n0} = D_{q0} n_0 / (D_{q0})_{ист}. \quad (17)$$

(формулы (17) получены для случая, когда при вычислении измеренных расстояний использовано стандартное значение показателя преломления, что, как правило, предусмотрено по умолчанию в программах современных электронных тахеометров и светодальномеров);

2) коэффициент обмена и градиент показателя преломления на высоте 1 м над 1-ой исходной поверхностью

$$b_1 = \frac{\delta r}{r_1^{an} (\Delta z / z_1)}; \quad (g_{вер})_{10}^{an} = -\frac{2r_{1z_1}^{an}}{\rho'' D_1 z_1^{b_1}}.$$

3-й и 4-й этапы вычислений в обеих схемах состоят в определении показателя преломления и его градиента сначала для каждого участка траектории по формулам (15), затем вычисляют их результирующее (расчетное) для данного направления значение по формулам (3).

Следует отметить, что кратко изложенный здесь алгоритм вычисления поправок за влияние ПСА рассчитан на выполнение полного комплекса мероприятий по учету влияния атмосферы. В зависимости от решаемых задач примерные схемы реализации комплексного подхода могут претерпевать значительные изменения в сторону уменьшения объема полевых и вычислительных работ.

**Методы и средства определения переменных параметров модели.** При использовании геодезической модели необходимо знать высоту визирного луча  $z_i$  на каждом участке трассы. В таблице 3 приведены требования к точности определения высоты визирного луча для трассы протяженностью 1 км при градиенте показателя преломления  $10^{-6}/\text{м}$ , что соответствует градиенту температуры  $1^\circ\text{C}/\text{м}$ , и коэффициенту обмена, равном (-1).

Таблица 3 – Требования к точности определения высоты траектории

Высота, м	Средняя квадратическая ошибка определения высоты, м	
	Угловые измерения	Линейные измерения
2	0,04	1,0
5	0,25	



Исключить из *дополнительных определений* самый трудоемкий их элемент – высоту траектории – позволяет предложенный автором прием *учета влияния ПСА без знания высоты визирного луча*. При использовании этого приема измерения вертикальных углов на рабочих направлениях выполняют на двух уровнях. Получены уравнения для определения эквивалентной высоты  $\bar{z}$  и угла рефракции  $r_1''$  на нижнем уровне

$$\delta r = -\rho'' \cdot g_{D0}^{an} \cdot b \cdot \Delta z \cdot \bar{z}^{b-1}, \quad r_1'' = -\rho'' \cdot g_{D0}^{an} \cdot \bar{z}^b + \rho'' D \cdot 0,019 \cdot 10^{-6}, \quad (18)$$

где 
$$g_{D0}^{an} = (g_{вер})_{10} \left( A_1 \frac{l_1 L_1}{D} + A_2 \frac{l_2 L_2}{D} + \dots + A_m \frac{l_m L_m}{D} \right) + 0,019 \cdot 10^{-6} D. \quad (19)$$

При использовании предложенного приема необходимость в определении высоты отпадает вовсе, а требования к точности определения других геометрических характеристик трассы снижаются до (8-9) м при высоте визирного луча 2 м и (20-23) м при средней высоте 5 м, что соответствует реальным возможностям и минимальным затратам труда и времени.

Комплексный подход предполагает определение показателя преломления и его градиента по результатам *периодических измерений* параметров атмосферы на двух исходных направлениях. Величина показателя преломления и угла рефракции является результатом совместного влияния целого комплекса факторов. Случайные изменения одного влияющего фактора или их совокупности в промежутке между измерениями приводят к снижению точности учета влияния атмосферы. Учесть случайные изменения в состоянии атмосферы позволяет *методика профильного комплексирования*.

Полный набор влияющих факторов связан с характеристикой атмосферы  $E$  функциональной зависимостью. Попытки обнаружения связи между *отдельным* влияющим фактором и параметром  $E$  не могут быть удачными, т.к.  $E$  – результат совокупного влияния всего комплекса факторов. При использовании профильного комплексирования влияющие факторы объединяем в профильные блоки по обобщающему признаку. Эти блоки, в свою очередь, разделяем на разрушающие и формирующие распределение параметров ПСА. На основании

логических рассуждений и математического моделирования формируем математические соотношения, которые:

- объединяют влияющие факторы внутри отдельных блоков;
- позволяют вычислить численные параметры, характеризующие результирующее влияние отдельного профильного блока на характеристику  $E$ .

Результаты исследований с применением профильного комплексирования включают:

- 1) математические соотношения для вычисления численных параметров профильных блоков, описывающие результирующее влияние отдельных блоков на характеристику  $E$ ;
- 2) уравнение, связывающее характеристику  $E$  с комплексом профильных блоков.

Первые позволяют корректировать параметры ПСА за изменение одного влияющего фактора или их комплекса. Второе служит для определения характеристики  $E$  по известным значениям влияющих факторов.

Изложенный подход опробован при моделировании угла вертикальной рефракции. Факторы, влияющие на величину угла рефракции, были распре-

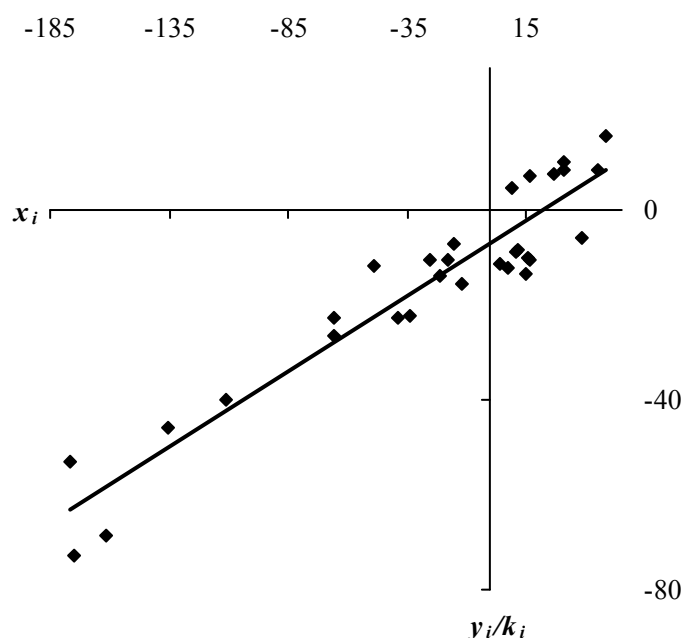


Рисунок 4 – График зависимости приведенного угла рефракции  $y_i/k_i$  от численного параметра формирующего блока

лены по двум профильным блокам – разрушающему и формирующему. Разрушающий блок включает ветер, облачность, высоту растительного покрова; формирующий – время суток, тип подстилающей поверхности, высоту визирного луча. По результатам 30 наблюдений за рефракцией и величиной влияющих факторов были получены формулы для вычисления численных параметров разрушающего  $\kappa$

и формирующего  $x$  блоков. График (рисунок 4) показал наличие тесной линейной зависимости между значениями  $y_i/\kappa_i$  и  $x_i$ , значение коэффициента корреляции равное 0,95 подтвердило это. Полученные результаты подтвердили обоснованность использования приема профильного комплексирования при решении двух упомянутых выше задач.

*Геодезический рефрактометр* позволяет учесть влияние рефракции на точность угловых измерений и служит дополнительным средством определения переменных параметров геодезической модели. Аппаратура реализует компенсационный способ измерения угла рефракции. Здесь имеет смысл выделить те конструктивные особенности рефрактометра, которые выгодно отличают его от других разработок и делают работоспособным в условиях реальной атмосферы.

Основными источниками ошибок при использовании оптико-электронного способа измерения угловой дисперсии и регистрации момента ее компенсации являются флуктуации интенсивностей и угла прихода световых лучей, а также разный размер площадей облучения вследствие разностной дифракции. Влияние двух первых ограничений в значительной мере ослаблено за счет включения атмосферы в отрицательную обратную связь. Исключить негативное влияние разностной дифракции позволяет кольцевой светофильтр. Для облегчения процессов модуляции, фильтрации, измерения в схеме предусмотрено преобразование сигнала в переменный ток. В целях автоматизации измерительного процесса в схему включены каналы автоматического визирования и автоматической компенсации дисперсионной разности.

Отметим ключевые моменты третьего раздела диссертации:

- концепция эффективного учета влияния ПСА заключается в использовании закономерностей приземного слоя атмосферы для рациональной организации измерений параметров ПСА и моделирования их пространственной изменчивости;
- разработанную концепцию реализуют геодезическая модель ПСА и комплекс методов и средств определения переменных параметров модели;

- результаты экспериментов подтвердили адекватность геодезической модели фактическому состоянию атмосферы и эффективность использования геодезической модели в сочетании с принципами рациональной организации полевых измерений;
- способ учета влияния атмосферы без знания высоты визирного луча, методика профильного комплексирования, геодезический градиентометр и угловой рефрактометр служат дополнительными средствами повышения эффективности учета влияния ПСА.

**Четвертый раздел** посвящен вопросу практического применения комплексной концепции учета влияния ПСА на геодезические измерения. Круг задач, эффективному решению которых способствует использование комплексной концепции, разделен автором на задачи *прямого* и *обратного* с точки зрения геодезии характера. *Прямая* задача направлена на коррекцию результатов геодезических измерений за влияние ПСА. *Обратная* задача носит прикладной характер для специалистов в областях науки и производства, результаты деятельности которых зависят от состояния атмосферы, степени ее изученности и возможности учета изменчивости атмосферы. *Объект* изучения при решении *обратной* задачи – атмосфера. *Исходными данными* служат результаты геодезических измерений, искаженные влиянием атмосферы. *Средство* решения – математический аппарат и теоретические положения, положенные в основу геодезической модели и методики профильного комплексирования.

В четвертом разделе дана краткая характеристика тех геодезических задач, при решении которых преимущества комплексной концепции, состоящие в ее эффективности и универсальном характере реализуются в полной мере. Сюда отнесены задачи, решаемые посредством угловых и линейных измерений в ПСА и нуждающиеся в коррекции за влияние ПСА вследствие высоких требований к точности или значительного влияния атмосферы, обусловленного особенностями проведения геодезических работ. Технологии использования комплексной концепции при решении конкретных задач приведены в Приложениях В-Е. Все они основаны на общих принципах:

- 1) учета влияния вертикальной рефракции;
- 2) учета влияния горизонтальной рефракции;
- 3) коррекции результатов линейных измерений на наземных и наклонных трассах;
- 4) комплексного учета влияния атмосферы в электронной тахеометрии, разработке и апробации которых практически целиком посвящен четвертый раздел диссертации.

*Учет вертикальной рефракции*, повышение точности тригонометрического нивелирования – это вопрос эффективности всего геодезического производства в целом, обязательное условие полной реализации приборных возможностей электронных тахеометров. Экспериментальная апробация технологии учета вертикальной рефракции состояла в моделировании вертикальной рефракции по направлениям Ц-1 (рис. 2) и Ц-5. Переменные параметры модели определялись *геодезическим* способом. Для учета изменений в характере подстилающей поверхности использованы *абсолютные* переходные коэффициенты. Средняя квадратическая ошибка определения угла рефракции по направлению Ц-5 составила  $\sim 1''$ .

Для однородных трасс разработана *технология учета влияния вертикальной рефракции с минимальными затратами*. Технология позволяет в значительной мере ослабить влияние рефракции на результаты тригонометрического нивелирования, эффективна при использовании электронных тахеометров. Обязательное в электронной тахеометрии измерение метеоэлементов в точке стояния прибора дополняем измерениями температуры на двух вспомогательных уровнях. Оптимально организовать градиентные метеоизмерения позволяет использование геодезического градиентометра. Для того, чтобы использовать принцип учета влияния атмосферы без знания высоты, вертикальный угол на рабочем направлении измеряем на дополнительном уровне.

Технология *учета горизонтальной рефракции* использована для определения угла боковой рефракции. Результаты моделирования сравнивались с результатами, полученными с использованием точного значения горизонтального угла, из-

вестного из многократных измерений, выполненных в периоды изотермии. Средняя квадратическая ошибка определения угла боковой рефракции составила  $\sim 1''$ .

Изложенные в третьем разделе принципы моделирования параметров атмосферы в среднем и верхнем ПСА легли в основу *технологии определения результирующего показателя преломления на наклонных трассах*. На рисунке 5 представлены графики вертикального хода индекса преломления, построенные по результатам радиозондирования атмосферы (кривая 1), с помощью биэкспоненциальной (кривая 2) и геодезической (кривая 3) моделей. В рассмотренном случае погрешность определения результирующего показателя преломления составляет  $(3,2 \cdot 10^{-7})$ . Полученные результаты убеждают в работоспособности геодезической модели во всей толще ПСА даже при отсутствии фактических данных о распределении метеоэлементов на больших высотах.

Разработана технология учета влияния атмосферы в электронной тахеометрии при использовании стандартного программного обеспечения. Используя расчетное значение показателя преломления  $\bar{n}$ , определенное по формуле (3), вычисляют эквивалентную температуру  $T_{\text{экв}}$

$$T_{\text{экв}} = \frac{79,32 \cdot P_{\text{см}}}{(\bar{n} - 1) \cdot 10^6} - 273,15. \quad (20)$$

Эквивалентная температура соответствует тому значению температуры, которое она приняла бы в сухом воздухе при величине показателя преломления  $\bar{n}$  и стандартном атмосферном давлении  $P_{\text{см}}$ . Полученное по формуле (20) эквивалентное значение температуры вводим в тахеометр, что позволяет исправить за влияние атмосферы результаты линейных измерений.

В тех случаях, когда программным обеспечением тахеометра предусмотрено введение коэффициента рефракции  $k$ , возможна коррекция за влияние атмосферы результатов измерения вертикальных углов

$$k_{\text{экв}} = 2R \cdot \bar{r} / (\rho''D), \quad (21)$$

где  $k_{\text{экв}}$  – эквивалентный коэффициент рефракции,  $R$  – радиус Земли,  $\bar{r}$  – расчетное значение угла рефракции, определенное по формуле (3).

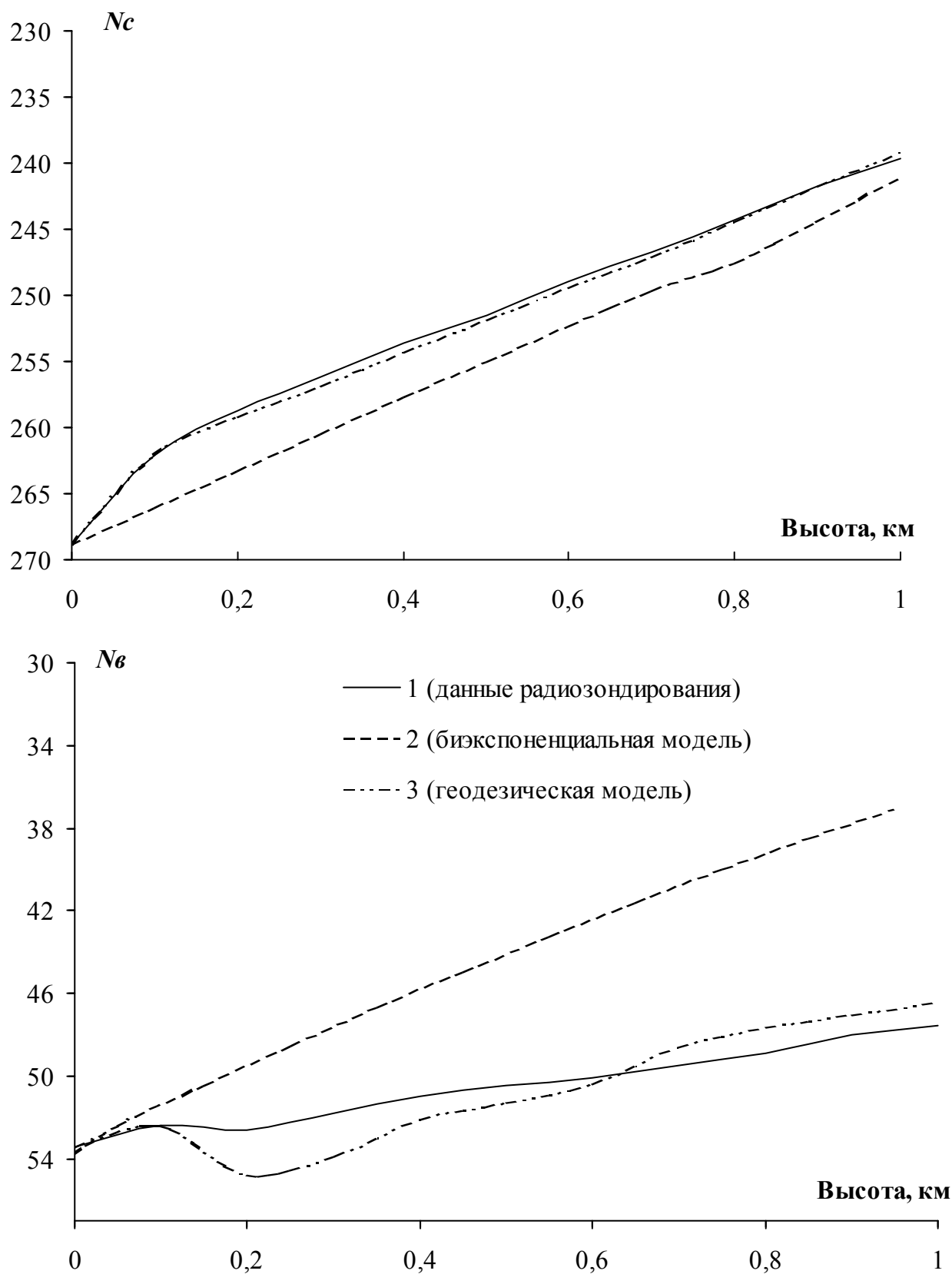


Рисунок 5 – Вертикальное распределение индексов преломления сухого ( $N_c$ ) и влажного ( $N_v$ ) воздуха

*Технология комплексного учета влияния ПСА в электронной тахеометрии* опирается на изложенные выше принципы учета влияния атмосферы на результаты угловых и линейных измерений, рассчитана на геодезический способ определения переменных параметров атмосферы, конкретизирована для случая геодезического обеспечения строительства мостового перехода. Выбор этого примера практического применения не случаен и как ни один другой убедительно реализует основные достоинства комплексного подхода (таблица 4).

Таблица 4 – Особенности учета влияния ПСА при строительстве мостового перехода

<b>Особенность решаемой геодезической задачи</b>	<b>Вывод</b>
Высокие требования к точности геодезических определений	Влияние ПСА заметно искажает <i>все</i> геодезические измерения.
Геодезические работы осуществляются на границе раздела двух резко отличающихся поверхностей при заметном перепаде высот	Вывод о необходимости учета боковой рефракции делают на основании длины траектории и геометрии ее расположения относительно береговой линии
Геодезические работы выполняются в течение длительного периода времени	Оправданы затраты на организацию двух исходных направлений
При работе в прибрежной зоне число подстилающих поверхностей можно ограничить двумя	Отпадает необходимость определения и использования переходных коэффициентов

Экспериментальные исследования, выполненные на полигоне Усовка (рис. 2), позволили скорректировать технологию учета влияния ПСА в электронной тахеометрии. В результате получена обоснованная теоретически и экспериментально *технология учета влияния атмосферы в электронной тахеометрии с минимальными затратами*. Технологию, рассчитанную на учет влияния атмосферы на результаты измерения превышений и расстояний, отличает:

1. Комбинированный способ определения параметров модели – для определения коэффициента обмена использованы метеорологические измерения (градиентные измерения температуры), для определения градиента показа-



теля преломления использованы геодезические измерения (измерения вертикального угла на основном и дополнительном уровне);

2. Скорректирован математический аппарат – учет вертикальной рефракции сводится к определению поправки в измеренное превышение по формуле вида:

$$\delta h_i = -\Delta h_{j-i} \frac{z_i^b}{z_j^b - z_i^b} - 0,019 \cdot 10^{-6} D^2,$$

где  $\Delta h_{j-i}$  – разность превышений, определенных по измерениям углов на уровнях  $z_i$  и  $z_j$ .

Анализ результатов экспериментов по апробации технологии учета влияния атмосферы в электронной тахеометрии с минимальными затратами позволил сделать следующие выводы:

1. В сравнении со стандартной программой (использование постоянного коэффициента рефракции) предложенная технология позволяет на порядок повысить точность учета влияния вертикальной рефракции (рис. 6).
2. Объем дополнительных измерений сведен к минимуму:
  - основную программу *геодезических измерений* следует дополнить измерениями вертикальных углов на дополнительных уровнях, реализация этого условия не представляет труда (отражатели в комплекте электронного тахеометра закреплены на телескопической штанге);
  - метеорологические измерения помимо обязательного измерения температуры и давления на высоте инструмента в начале дистанции следует дополнить измерениями температуры на двух вспомогательных уровнях.

Выполненные исследования однозначно свидетельствуют об эффективности использования разработанной концепции в электронной тахеометрии. Полную отдачу получаем при использовании геодезического градиентометра, реализованного в едином комплексе с электронным тахеометром.

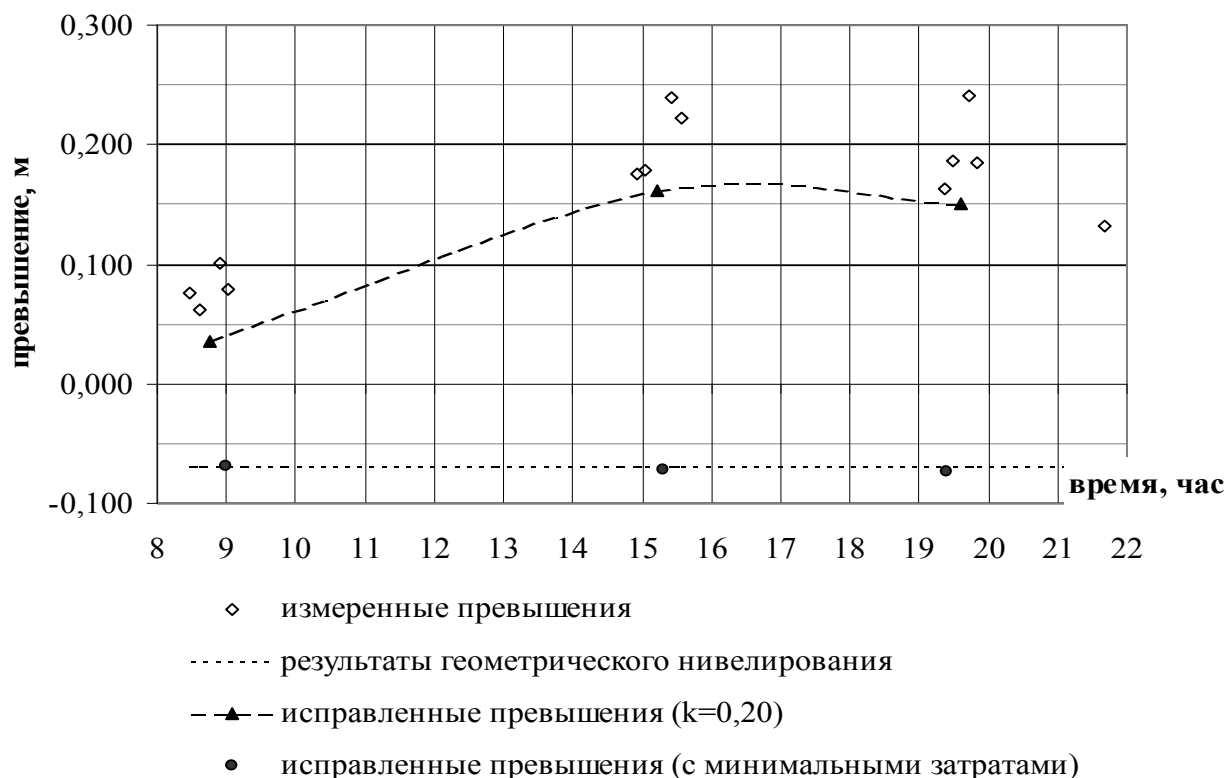


Рисунок 6 – Значения превышений по направлению 2-4

Математический аппарат геодезической модели в сочетании с приемом профильного комплексирования позволяет эффективно решать обратную задачу. В четвертом разделе работы экспериментально и теоретически обоснована возможность определения параметров физического состояния ПСА и агрофизических параметров почвы (АФП) по результатам угловых и линейных геодезических измерений. Определения параметров физического состояния воздуха и почвы по результатам геодезических измерений имеют практический выход при решении ряда задач в метеорологии, микроклиматологии и сельском хозяйстве.

«Корректирование геодезической модели ПСА и уточнение ее параметров» автор выделила в отдельное направление в *обратной* задаче. Однако, по своей сути, вся диссертационная работа в значительной мере представляет собой решение этой задачи. Результаты параллельных наблюдений за рефракцией и состоянием ПСА, анализ полученных материалов – это тот аппарат, посредством которого геодезическая модель разработана и обоснована.

## Заключение

В результате выполненных исследований разработана **концепция эффективного учета влияния приземного слоя атмосферы** на геодезические измерения, которая

- опирается на выявленные закономерности ПСА;
- обеспечивает *эффективное моделирование* пространственной изменчивости параметров ПСА по ограниченному числу измерений;
- обладает *универсальностью* (возможностью использования как при угловых, так и при линейных измерениях).

Для реализации концепции эффективного учета влияния ПСА на геодезические измерения:

1) разработана *геодезическая модель* ПСА, отличающаяся от существующих моделей следующими особенностями:

- геодезическая модель ориентирована на моделирование показателя преломления и его вертикального и горизонтального градиентов, что привязывает модель к геодезическим целям и обеспечивает ее универсальный характер;
- использован дифференциальный принцип моделирования (моделируются не сами параметры атмосферы, а их изменение), что обеспечивает повышение точности моделирования;
- моделирование параметров атмосферы осуществляется в пространстве, т.е. учитывается изменение состояния атмосферы как в горизонтальной, так и вертикальной плоскости;
- ограничение района работ размерами местных полей показателя преломления до минимума сужает набор факторов, подлежащих учету (характер подстилающей поверхности и высота над ней), что в значительной мере упрощает процесс моделирования;

2) предложен и апробирован способ эффективной организации полевых измерений, преимущества которого заключаются в следующих положениях:

- возможность выбора оптимального для потребителя (геодезического или метеорологического) способа измерения параметров атмосферы;

– измерения параметров атмосферы в районе выполнения геодезических работ ограничены двумя пунктами (направлениями), которые расположены над наиболее отличающимися по своим микроклиматическим свойствам поверхностями, что позволяет сократить объем полевых измерений и обеспечивает контроль результатов горизонтального моделирования;

– измерения параметров атмосферы выполняют на двух (при использовании геодезического способа) или трех (при использовании метеорологического способа) уровнях, что позволяет учесть нелинейный характер изменения состояния атмосферы с высотой и обеспечивает работоспособность модели вне зависимости от механизма передачи тепла в верхние слои воздуха и типа вертикального распределения параметров атмосферы;

3) предложен *принцип учета влияния ПСА без знания высоты* визирного луча, позволяющий исключить из дополнительных определений самый трудоемкий элемент – высоту визирного луча (значение вертикального угла, измеренное на дополнительном уровне, используется для определения эквивалентной высоты);

4) разработана и апробирована *методика профильного комплексирования*, при использовании которой все влияющие факторы объединяются в блоки (комплексы) по характеру влияния на определяемую характеристику атмосферы (профилю), что позволяет учесть случайные изменения влияющих факторов в промежутке между измерениями;

5) разработана усовершенствованная схема *углового рефрактометра*, реализующая компенсационный способ измерения угла рефракции, за счет включения атмосферы в отрицательную обратную связь обеспечены стабильные результаты в реальной атмосфере (научная новизна подтверждена патентом РФ на изобретение);

6) предложен и реализован в опытном образце, прошедшем апробацию в полевых условиях, *геодезический градиентометр*, данное устройство позволяет рационально организовать градиентные измерения параметров атмосферы и полностью интегрировать процесс определения поправок за влияние атмосферы в электронную тахеометрию;

7) разработана *технология практического применения*, обеспечивающая внедрение концепции эффективного учета влияния ПСА в геодезическое производство, технология ориентирована на решение конкретных геодезических задач, положенная в ее основание универсальная по своему характеру геодезическая модель обеспечивает широкий спектр практического применения и возможность адаптации технологии к меняющимся реалиям геодезического производства (точность коррекции угловых измерений – 1", линейных –  $10^{-6}$ ).

Изложенные в диссертации технические и технологические решения вносят значительный вклад в развитие отраслей экономики, использующих геодезическую информацию. Совокупное использование концепции эффективного учета влияния ПСА и реализующего ее технологического комплекса открывает новое направление в решении проблемы учета влияния ПСА на геодезические измерения.

**Публикации** автора по теме диссертационной работы:

1. А.с. 1681205 СССР, МКИ G 01 N 21/41. Устройство для измерения атмосферной рефракции / О.В. Вшивкова, В.Ф. Калугин. – № 4688609, заявл. 5.04.89; опубл. 1.06.91, Бюл. № 36 (единолично – 50%).
2. А.с. 1763953 СССР, МКИ G 01 N 21/41. Устройство для измерения атмосферной рефракции / О.В. Вшивкова, В.Ф. Калугин. – № 4686372, заявл. 6.04.89; опубл. 22.05.92, Бюл. № 35 (единолично – 50%).
3. Пат. 2284508 РФ. МПК G 01 N 21/41, G 01 W 1/00. Угловой рефрактометр / О.В. Вшивкова, И.В. Калугин. – № 2005114926/28, заявл. 17.05.2005; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. – 2 с (единолично – 50%).
4. Вшивкова О.В., Калугин В.Ф., Калугин И.В. Рефракционные измерения и исследования в атмосфере / Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2003. – 189 с. – Деп. в ВИНТИ 10.04.2003, №680-В2003 (единолично – 76 стр.).
5. Вшивкова О.В., Калугин И.В. Дифференциальный способ электрических измерений влажности сыпучих веществ / Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2004.

– 139 с. – Деп. в ВИНТИ 28.01.2004, №151-В2004 (единолично – 35 стр.).

6. Вшивкова О.В. О технологии учета влияния рефракции с использованием результатов микроклиматических исследований // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1995. – № 3. – С. 66-70.

7. Вшивкова О.В. О комплексном подходе к решению рефракционной проблемы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 4,– С. 41-46.

8. Вшивкова О.В. О рабочей «геодезической» модели атмосферы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 5. – С. 22-29.

9. Вшивкова О.В. Инструментальные измерения угловой рефракции с адаптацией к внешним и приборным помехам и автоматизацией процесса измерений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 6.– С. 29-39.

10. Вшивкова О.В. Косвенные определения вертикальной рефракции // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2006. – № 1. – С. 46-51.

11. Вшивкова О.В. Учет влияния атмосферы на результаты угловых и линейных измерений, выполненных электронным тахеометром // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2006. – № 5. – С. 22-35.

12. Вшивкова О.В. Учет влияния атмосферы на результаты измерения расстояний электронным тахеометром // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 1. – С. 3-12.

13. Вшивкова О.В. О характере и степени влияния приземного слоя атмосферы на точность спутниковых определений и учете этого влияния // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 2. – С. 21-33.

14. Вшивкова О.В. Учет влияния приземного слоя атмосферы без знания высоты визирного луча // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2007. – № 3. – С. 17-22.

15. Вшивкова О.В. Профильное комплексирование как средство учета влияния приземного слоя атмосферы с минимальными затратами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 4. – С. 3-11.

16. Вшивкова О.В., Круглов С.Н. Учет изменения характера подстилающей поверхности вдоль измеряемой дистанции для целей повышения точности из-

мерения расстояний электронным тахеометром // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 5. – С. 3-9 (единолично – 5 стр.).

17. Вшивкова О.В. Рациональный учет рефракции с применением геодезического градиентометра // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010.– № 1.– С. 3-6.

18. Вшивкова О.В. Учет влияния атмосферы в электронной тахеометрии с использованием геодезического градиентометра // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2010 – № 3,– С. 3-10.

19. Вшивкова О.В. Повышение качества планировочных работ посредством учета влияния атмосферы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2010 – № 5,– С. 3-5.

20. Вшивкова О.В., Секанов Ю.П., Калугин И.В. Исследование и оперативное определение агрофизических параметров почвы для целей современного земледелия // Труды 5-ой Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (16-17 мая 2006 года, Москва, ГНУ ВИЭСХ). – Москва. – 2006. – Часть 5 «Инфокоммуникационные технологии». – С. 69-75 (единолично – 3 стр.).

21. Вшивкова О.В. Учет вертикальной рефракции в электронной тахеометрии с минимальными затратами // Итоги Международной научно-технической конференции, посвященной 230-летию основания МИИГАиК (25 мая 2009 г.). – Москва. – 2009. – Часть 2. – С. 17.

22. Вшивкова О.В., Калугин И.В., Калугина М.А. Применение профильного комплексирования формирующих параметров для повышения надежности результатов количественной оценки запасов и ресурсов углеводородов малоизученных районов Ямала // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений (приложение к журналу «Наука и техника в газовой промышленности»), 2006, № 2, С. 25-37 (единолично – 4 стр.).

23. Вшивкова О.В., Калугин И.В., Калугина М.А. Об учете влияния приземного слоя атмосферы на результаты спутниковых измерений на объектах нефтегазовой промышленности// Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и

газоконденсатных месторождений (приложение к журналу «Наука и техника в газовой промышленности»). – 2006. – № 3. – С. 14-16 (единолично – 1 стр.).

24. Вшивкова О.В., Калугин И.В. О принципиальной возможности исследований газовых потоков и микроклимата на объектах газовой и нефтяной промышленности геодезическими средствами // Трубопроводный транспорт (Теория и практика). Изд-во ЗАО «РИЦ-ВНИИСТ». – 2006. – № 3. – С. 102-105 (единолично – 3 стр.).

25. Вшивкова О.В., Калугин И.В. Об ограничениях относительного метода спутниковых измерений // Трубопроводный транспорт (Теория и практика). – Изд-во ЗАО «РИЦ-ВНИИСТ». – № 2. – 2006. – С. 103-105 (единолично – 2 стр.).