

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.522:551.510.522+534.88

Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара

А.П. Камардин, С.Л. Одинцов, А.В. Скороходов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 27.12.2013 г.

Представлена методика автоматической идентификации внутренних гравитационных волн (волн плавучести) в атмосферном пограничном слое по результатам дистанционного акустического зондирования. Методика основана на анализе эхограмм содара с использованием методов искусственного интеллекта и цифровой обработки изображений. Методика ориентирована на идентификацию определенного типа проявлений внутренних гравитационных волн на эхограммах содара и апробирована на большом количестве экспериментальных данных. Проведены оценки периодов и амплитуд внутренних гравитационных волн данного типа по тестовой выборке из 72 эхограмм содара.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, внутренние гравитационные волны, содар; atmospheric boundary layer, internal gravity waves, sodar.

Введение

Одними из важных процессов в устойчиво стратифицированной атмосфере являются генерация и распространение внутренних гравитационных волн (волн плавучести) [1]. Их теоретическому и экспериментальному исследованию посвящено значительное количество публикаций, обзоры которых можно найти, например, в [2, 3]. Интерес к изучению внутренних гравитационных волн (ВГВ) не ослабевает и в настоящее время. Это связано, в частности, с расширением возможностей дистанционного обнаружения и диагностики параметров ВГВ в атмосферном пограничном слое (АПС). Наряду с уже ставшими традиционными радиолокационными и акустическими методами регистрации проявлений ВГВ в АПС реализуются новые возможности, основанные на оптических (лидарных) и спутниковых технологиях (см., например, [4–7]). Различные теоретические аспекты генерации и распространения ВГВ также продолжают обсуждаться в печати (см., например, [8–11]).

Несмотря на достаточно частую регистрацию ВГВ в АПС, количественных данных об их характеристиках (амплитудах, длинах волн, наклонах фазовых поверхностей) пока не достаточно для решения таких задач, как «пеленг источника» ВГВ, исследование «анизотропии» поля ВГВ, влияние

потока ветра на характеристики ВГВ и т.п. Одной из причин недостаточной обеспеченности конкретными данными о параметрах ВГВ является определенная сложность выделения таких волн на фоне других процессов, протекающих в АПС. При дистанционном акустическом зондировании это связано, например, с идентификацией ВГВ на фоне турбулентного теплообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой, а также с низкими отношениями сигнал-шум, особенно на больших высотах.

Проблема выявления ВГВ актуальна при мониторинговом (непрерывном) режиме работы средств дистанционной акустической диагностики, когда отсутствует текущий контроль со стороны оператора, способного в реальном времени идентифицировать проявления ВГВ на эхограммах. Обработка накопленных экспериментальных данных обычно ведется в «отложенной» по времени форме и имеется вероятность пропуска проявлений ВГВ. В этой связи нами была поставлена и решена задача автоматического выделения проявлений определенного типа ВГВ на эхограммах доплеровского метеорологического локатора (содара) с последующими оценками их периодов и амплитуд. Исходным экспериментальным материалом служил архив результатов многолетней работы содаров серии «Волна» ([12–14]), разработанных в ИОА СО РАН. Определенная обработка проявлений ВГВ по содарным данным проводилась нами ранее [15, 16].

Коротко напомним «технологии» акустического зондирования атмосферы, теоретические основы которого представлены в работе [17]. Звуковой

* Андрей Павлович Камардин (kap136@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru); Алексей Викторович Скороходов (vazime@yandex.ru).

импульс, заполненный какой-либо несущей частотой f , проходя по трассе зондирования, рассеивается на высоте H объемом воздуха $W(H)$, занятого зондирующим импульсом. Причем в обратном направлении сигнал формируется за счет рассеяния зондирующего излучения только на температурных пульсациях. Регистрируя обратно рассеянный звуковой сигнал, по его амплитуде A можно судить об интенсивности температурных пульсаций на разных высотах H (квадрат амплитуды сигнала пропорционален дисперсии температуры в объеме воздуха W), а по доплеровскому сдвигу частоты Δf (Гц) — о проекции V_r среднего вектора движения объема воздуха W на направление зондирования (V_r — «радиальная» скорость). Последовательная посылка зондирующих импульсов в моменты времени t_i и регистрация сигналов с высот H_j обеспечивают получение картины высотно-временного распределения амплитуды $A(t_i, H_j)$ (эхোগраммы) и/или скорости $V_r(t_i, H_j)$ («велограммы»). Можно сказать, что эхограмма содара в определенной мере отражает картину высотно-временного распределения дисперсии температуры воздуха в АПС.

Присутствие ВГВ в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое влияет на структуру поля ветра и температуру воздуха, приводя к их периодическому изменению на высоте H_j (убедительный экспериментальный материал по данному вопросу приведен, например, в [18, гл. 7, 8]). При этом внутренние волны могут создавать в областях гидродинамической неустойчивости достаточно тонкие турбулентные слои. Возможные механизмы образования таких слоев (тонкослойной микроструктуры) рассмотрены, в частности, в [19, § 29, § 35]. На эхограммах содара эти слои проявляются в форме волнообразных структур с достаточно четко выделенными контурами. Для примера сошлемся на одни из первых публикаций по данной проблеме [20, 21], где показаны проявления ВГВ на эхограммах содара при одновременной регистрации ВГВ микробарографами. Присутствие ВГВ в АПС проявляется и на «велограммах» $V_r(t_i, H_j)$. Например, в недавних публикациях [5, 22] приведены «велограммы» вертикальной составляющей вектора ветра, а в [23] — горизонтальной.

Энергетика турбулентности при устойчивой стратификации с учетом влияния внутренних гравитационных волн исследована в [24, 25] путем численного моделирования суточного хода АПС (тонкослойная микроструктура ВГВ не учитывалась). По результатам этих работ можно составить представление о связи интенсивности турбулентного перемешивания с градиентным (или потоковым) числом Ричардсона, характеризующим степень устойчивости. Для устойчивой в целом стратификации АПС степень устойчивости может изменяться по высоте. Это приводит к тому, что в областях с относительно слабой устойчивостью возможна генерация достаточно интенсивной температурной

турбулентности. И эту турбулентность отчетливо «видит» содар.

В областях с сильно устойчивой стратификацией сдвиговые напряжения в потоке ветра если и способствуют генерации температурных пульсаций, то быстро затухают. Поэтому содар не может их зафиксировать. И только внутренняя гравитационная волна способна создать в этом случае интенсивную тонкослойную турбулентную структуру (согласно [19]), которая может быть зафиксирована содаром. Примером рассмотренной ситуации служит рис. 1, *a*, где приведена эхограмма содара «Волна», полученная в условиях радиационной (ночной) инверсии температуры.

В нижнем слое, до высоты примерно 300 м, наблюдается турбулентный теплообмен одновременно с проникающей в этот слой ВГВ (проявляющейся в виде периодической модуляции положения верхней границы слоя). На больших высотах, где степень устойчивости выше, содаром были зарегистрированы только тонкие волнообразные слои температурной турбулентности, связанные с микроструктурой проходящей ВГВ (другие механизмы генерирования температурных неоднородностей подобного типа маловероятны).

Формы проявления ВГВ на эхограммах содара достаточно разнообразны. Приведем лишь несколько типичных примеров. На рис. 1, *a* показан уже обсуждавшийся выше пример «приподнятой волны + + приземной волны», на рис. 1, *b* — «однослойная приподнятая волна» (конвективная структура АПС до высот 600–900 м, «накрытая» температурной инверсией с волнообразным проявлением ВГВ на границе между конвективным и инверсионным слоями), на рис. 1, *в* — «приземная волна» (проявление ВГВ в нижнем слое атмосферы со слабоустойчивой стратификацией). Каждому пикселю изображений на рис. 1 сопоставлен определенный уровень сигнала (точнее, смеси сигнал + шум) — чем темнее пиксель, тем больше значение $A(t_i, H_j)$ (здесь и на других рисунках амплитуда выражена в произвольных единицах).

Другие возможные формы проявления ВГВ на эхограммах можно найти в указанных выше работах и в иных публикациях с результатами акустического зондирования АПС. Приведенные на рис. 1 эхограммы не подвергались какой-либо предварительной обработке и поэтому демонстрируют возмужную степень сложности идентификации ВГВ на общем фоне турбулентного температурного поля и акустического шума. Основная цель нашей работы заключалась в построении и апробации алгоритма автоматического выделения и «оконтуривания» таких проявлений ВГВ, которые представлены на рис. 1, *в*. Обязательным условием идентификации данного типа ВГВ было то, что «контур» волны («треугольник») должен достигать нижнего уровня зондирования (50 м). При этом последовательные «треугольники» могут быть перекрывающимися.

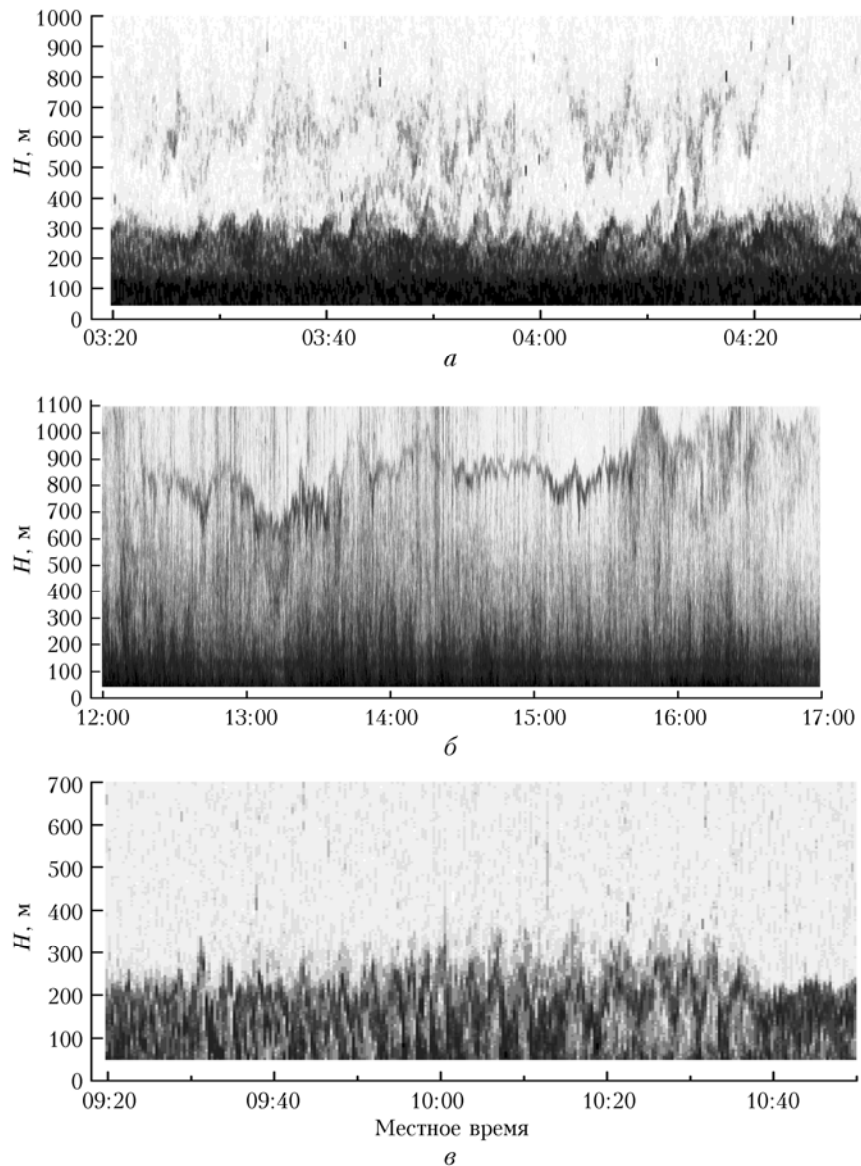


Рис. 1. Примеры проявления внутренних гравитационных волн на эхограммах содара

Алгоритм идентификации внутренних гравитационных волн

Поскольку представляемая методика обработки эхограмм содаров, насколько нам известно, еще не применялась, мы сочли возможным в данном разделе изложить в общих чертах разработанный алгоритм распознавания проявлений ВГВ заданного типа, надеясь на полезную дискуссию по обоснованности и эффективности его применения.

Задачу обнаружения ВГВ можно сформулировать как задачу классификации изображений на два кластера («волна/не волна») с последующим построением контуров волнового процесса. Для идентификации изображения мы использовали метод Виолы–Джонса, в основе которого лежит каскадный классификатор Хаара [26]. Реализация данного метода была взята из свободно распространяе-

мой библиотеки OpenCV [27] и адаптирована для решения задачи идентификации проявлений ВГВ.

Метод Виолы–Джонса относится к классу алгоритмов, «обучаемых с учителем». Поэтому на этапе «обучения» нами были сформированы две выборки образцов: «обучающая», состоящая из 800 фрагментов изображений проявлений ВГВ на эхограммах содара (рис. 2, *a*), и «фоновая», включающая в себя 500 типичных фрагментов эхограмм, на которых проявления ВГВ отсутствуют (рис. 2, *b*). Следует отметить, что образцы подбирались экспертным путем на основе визуального анализа тестовой выборки, состоящей из 105 эхограмм (общая длительность наблюдений порядка 1200 ч).

Метод Виолы–Джонса оперирует с интегральным представлением изображения – матрицей, совпадающей по размерам с этим изображением. В каждом элементе такой матрицы хранится сумма интенсивностей всех пикселей, находящихся левее и выше

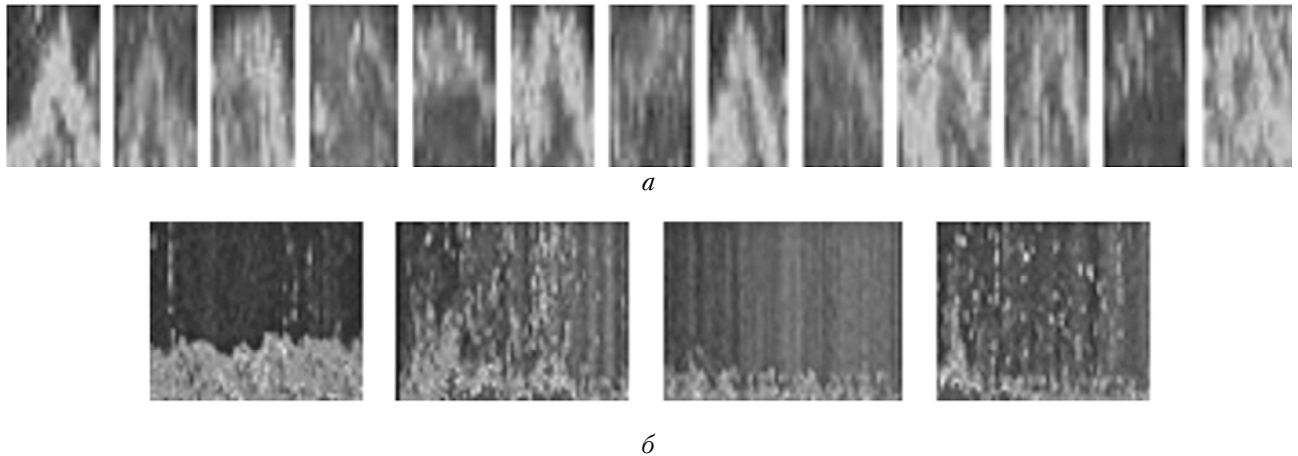


Рис. 2. Примеры выборок изображений, необходимых для «обучения» метода Виолы–Джонса: *a* – обучающая; *б* – фоновая

данного элемента [28]. В качестве классификатора используется автоматически формируемое алгоритмом бустинга [29] дерево решений (каскадный классификатор Хаара). Реализованный алгоритм обучения можно кратко записать в следующем виде.

1. Перед началом обучения инициализируются его параметры: количество стадий обучения, число ветвей в дереве решений, минимальная частота попаданий, максимальный уровень ложных срабатываний для каждой стадии и др. При этом число стадий необходимо подбирать в соответствии с качеством получаемых результатов классификации, чтобы избежать переобучения или недостаточного обучения.

2. На каждой стадии производится «подстановка» обучающих образцов в изображения фона и вычисляются признаки Хаара. Таким образом, алгоритмом обучения «моделируются» ситуации, с которыми предстоит работать классификатору.

3. Определяются пороговые значения признаков Хаара, на основании которых будет приниматься решение о принадлежности фрагмента изображения к проявлению ВГВ. На основе пороговых классификаторов формируется дерево решений с заданным на этапе инициализации параметров числом узлов.

4. Алгоритм прекращает обучение после выполнения всех стадий обработки или из-за невозможности формирования нового узла в дереве решений. Последний вариант рассматривается как ошибка обучения, поскольку требуемая точность не была достигнута.

Процедура непосредственной идентификации проявления ВГВ реализована по следующему алгоритму:

а) классифицируемое изображение начинает сканироваться скользящим окном размером 10×10 пикселей (размер образцов, к которому были приведены элементы обучающей выборки);

б) для каждого положения скользящего окна вычисляются признаки Хаара (в нашем случае – несколько тысяч);

в) полученные признаки подаются на вход каскадного классификатора, который принимает решение о наличии либо отсутствии проявлений ВГВ на эхограмме;

г) после прохода всего изображения размер скользящего окна увеличивается на величину коэффициента масштабирования, который в данной работе равнялся 10%, и повторяются шаги 1–3.

Процедура классификации завершается после того, как классифицируемое изображение будет обработано скользящим окном наибольшего размера в соответствии с размером эхограммы. Таким образом, алгоритм позволяет на эхограмме выделять проявления ВГВ, имеющие разные размеры.

На рис. 3 (цвет. вклейка) показан пример идентификации проявлений ВГВ на эхограмме содара (рис. 3, *a*) по изложенной выше методике. Согласно рис. 3, *б* алгоритм адекватно определяет фрагменты изображения, принадлежащие проявлениям ВГВ (выделены прямоугольниками) в этом эпизоде. Цветовая шкала амплитуд $A(t_i, H_j)$ сигналов содара в произвольных единицах приведена справа от эхограммы. Эхограмма получена 19.08.2009 (место наблюдений г. Томск) и соответствует периоду разрушения ночной (радиационной) температурной инверсии, когда после восхода Солнца активизируются процессы турбулентного теплообмена между прогревающейся подстилающей поверхностью и атмосферой. На момент начала работы содара (начало эхограммы) в АПС уже сформировалась внутренняя гравитационная волна, проявляющаяся на эхограмме в виде периодических структур в форме «треугольников». В процессе развития теплообмена турбулентная область расширяется, разрушая нижнюю часть приземной инверсии температуры и переводя ее в разряд приподнятых инверсий. Проявления ВГВ в рассматриваемом эпизоде наблюдались до 10:15 местного времени. Полное разрушение инверсии произошло к 11 ч.

Методика оценок характеристик проявлений внутренних гравитационных волн

Для исследования ВГВ необходимо определять не только их присутствие в АПС, но и получать количественные характеристики, например ампли-

туду волны H_m (в нашем случае – высоту положения вершины «треугольника» с номером m), динамику волнового процесса (контур проявления ВГВ на эхограмме) и периоды T_m (интервалы времени между вершинами последовательных «треугольников» с номерами m и $m + 1$). С этой целью была разработана и апробирована методика автоматического определения характеристик идентифицированных проявлений ВГВ.

На первом этапе анализа производится определение координат вершины «треугольника» в каждом из фрагментов, входящих в набор из M найденных классификатором эпизодов с проявлением ВГВ. В итоге формируется двумерный массив координат $\{i_m, j_m\}$, $m = 1, 2, \dots, M$, содержащий индексы точек положения этих вершин. По этому массиву определяются значения амплитуд H_m и периодов T_m проявлений ВГВ.

Следующий этап обработки заключается в формировании массивов координат контуров проявлений ВГВ. Применение одного из самых эффективных алгоритмов построения контуров объектов на изображениях – алгоритма Кэнни [30] – не дало требуемых результатов из-за сильной «зашумленности» эхограмм. Поэтому нами был разработан специальный алгоритм выделения контуров. Построение контура начинается от найденного максимума проявления ВГВ с номером m (от вершины «треугольника» с координатами $\{i_m, j_m\}$). С использованием анализа градиентов амплитуд сигналов по координатным осям t и H , включающего применение некоторых эмпирически определенных условий, на эхограммах выделяются точки, с наибольшей вероятностью принадлежащие контуру волны под номером m . В итоге формируется M двумерных массивов, каждый из которых содержит координаты контура отдельной «волны».

На рис. 3, *г* показаны выделенные контуры волнового процесса по эхограмме, представленной на рис. 3, *а* (визуализация M массивов контуров проявлений ВГВ). Наложение контуров на исходное изображение (рис. 3, *б*) демонстрирует удовлетворительный результат работы алгоритма, поскольку контуры в целом согласуются с визуально определяемыми на эхограмме проявлениями ВГВ.

Результаты обработки

Как уже указывалось выше, разработанный алгоритм идентификации ВГВ и определения их характеристик был апробирован на 105 эхограммах. По итогам предварительной визуальной оценки было установлено наличие проявлений ВГВ на 72 эхограммах. Остальные эхограммы были использованы для проверки алгоритма на ложные срабатывания. В результате обработки установлено, что алгоритм идентифицировал проявления ВГВ на всех 72 эхограммах при отсутствии ложных обнаружений на остальных. Необходимо отметить, что алгоритмом принималось решение о наличии ВГВ

на эхограмме, если идентифицировалось не менее 15 подряд идущих «треугольников» с периодом между двумя соседними не более 10 мин. Такая предварительная настройка алгоритма была сделана для исключения ложных срабатываний на случайно сформированных контурах на эхограммах, подобных реальным проявлениям ВГВ.

По итогам обработки были определены амплитуды H_m и периоды T_m идентифицированных проявлений ВГВ. Их гистограммы (число попаданий в заданные интервалы) показаны на рис. 4. Среднее

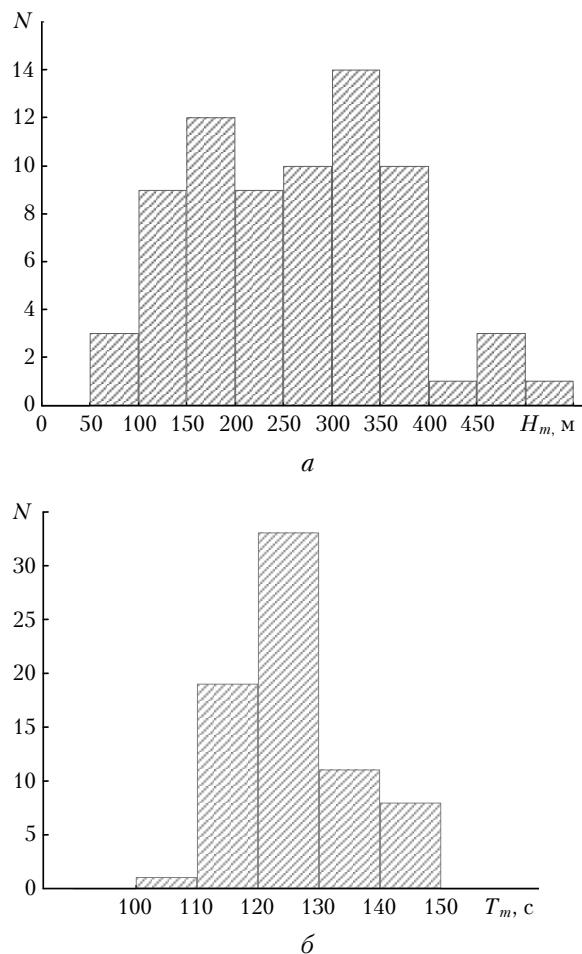


Рис. 4. Гистограммы амплитуд H_m (*а*) и периодов T_m (*б*) проявлений ВГВ по обработанной выборке эхограмм содара

значение амплитуд составляет $\bar{H}_m = 263$ м, а среднее значение периодов $\bar{T}_m = 127$ с. Напомним, что представленная на рис. 4, *б* гистограмма периодов T_m сформирована по результатам обработки с заданным условием $T_m \leq 10$ мин. Приведенные оценки H_m и T_m в целом согласуются с данными других авторов о периодах и амплитудах ВГВ в пограничном слое атмосферы, полученными на основе акустического зондирования атмосферы (см., например, [5, 31]), а также с данными о периодах ВГВ по измерениям на высотной метеорологической мачте [18].

Заключение

Основными результатами работы являются алгоритм автоматического выделения на эхограммах содара проявлений определенного типа внутренних гравитационных волн и оценка их количественных характеристик: амплитуд и периодов. Разработан и реализован алгоритм автоматического выделения контуров «волн» на эхограммах, позволяющий в дальнейшем более детально исследовать особенности проявлений ВГВ в пограничном слое атмосферы. Алгоритм имеет вид программного комплекса, позволяющего проводить полный цикл обработки сигналов содара — от построения на их основе эхограмм до получения числовых характеристик проявлений ВГВ. Обработка тестовой выборки, состоящей из 105 эхограмм, показала, что алгоритм выделил все случаи, когда на эхограммах имели место проявления ВГВ, при отсутствии ложных обнаружений. На основе этой же выборки были определены амплитуды и периоды проявлений ВГВ. Установлено, что среднее значение амплитуд периодических изменений высоты слоев с повышенной дисперсией температуры (проявлений ВГВ в нижнем слое тропосферы) составило 263 м, а среднее значение периодов таких колебаний — 127 с.

Необходимо отметить, что амплитуды и периоды проявлений волнообразных движений в АПС могут изменяться на протяжении рассматриваемого эпизода. Кроме того, отдельные «волны» могут перекрывать друг друга. Более детальный анализ таких особенностей, а также построение алгоритмов автоматического обнаружения и определения характеристик других типов проявлений ВГВ на эхограммах содара планируется провести в дальнейшем.

1. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М: Мир, 1978. 532 с.
2. Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофиз. 1999. Т. 42, № 1. С. 3–24.
3. Chimonas G. Steps, waves and turbulence in the stably stratified planetary boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 1999. V. 90, N 3. P. 397–421.
4. Reinking R.F., Frisch A.S., Orr B.W., Korn D.L., Bissonnette L.R., Roy G. Remote sensing observations of effects of mountain blocking on travelling gravity-shear waves and associated clouds // Boundary-Layer Meteorol. 2003. V. 109, N 3. P. 255–284.
5. Petenko I., Mastrantonio G., Viola A., Argentini S., Pietroni I. Wavy vertical motions in the ABL observed by sodar // Boundary-Layer Meteorol. 2012. V. 143, N 1. P. 125–141.
6. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 908–916.
7. Martucci G., Matthey R., Mitev V., Richner H. Frequency of boundary-layer-top fluctuations in convective and stable conditions using laser remote sensing // Boundary-Layer Meteorol. 2010. V. 135, N 2. P. 313–331.
8. Бардаков Р.Н., Чашечкин Ю.Д. Расчет и визуализация двумерных присоединенных внутренних волн в вязкой экспоненциально стратифицированной жид-

- кости // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40, № 4. С. 531–544.
9. Свиркунов П.Н., Калашиник М.В. Фазовые картины волн от локализованных источников, движущихся относительно стратифицированной вращающейся среды (перемещающийся ураган, орографическое препятствие) // Докл. РАН. 2012. Т. 447, № 4. С. 396–400.
10. Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleorin N., L'vov V., Rogachevskii I. Energy- and flux-budget turbulence closure model for stably stratified flows. Part II: The role of internal gravity waves // Boundary-Layer Meteorol. 2009. V. 133, N 2. P. 139–164.
11. LARGERON Y., STAQUET C., CHAMEL C. Characterization of oscillatory motion in the stable atmosphere of a deep valley // Boundary-Layer Meteorol. 2013. V. 148, N 2. P. 439–459.
12. Гладких В.А., Макиенко А.Э., Фёдоров В.А. Акустический доплеровский локатор «Волна-3» // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 5. С. 437–444.
13. Фёдоров В.А. Измерение содаром «Волна-3» параметров радиальных компонент вектора скорости ветра // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 2. С. 151–155.
14. Фёдоров В.А. К измерению содаром параметров модуля и направления горизонтальной скорости ветра // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 1–2. С. 91–99.
15. Odintsov S.L. Analysis of microstructure of short-period internal gravity waves // Proc. 11th Int. Sympos. Acoust. Remote. Sens. Rome, Italy, 24–28 June 2002. P. 271–274.
16. Одинов С.Л. Особенности движений нижнего слоя атмосферы при прохождении внутренних гравитационных волн // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 12. С. 1131–1136.
17. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
18. Бьзова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 264 с.
19. Монин А.С. Теоретические основы геофизической гидродинамики. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 424 с.
20. Hooke W.H., Young J.M., Beran D.W. Atmospheric waves observed in the planetary boundary layer using an acoustic sounder and microbarograph array // Boundary-Layer Meteorol. 1972. V. 2, N 3. P. 371–380.
21. Beran D.W., Hooke W.H., Clifford S.F. Acoustic echosounding techniques and their application to gravity-wave, turbulence, and stability studies // Boundary-Layer Meteorol. 1973. V. 4, N 1–4. P. 133–153.
22. Argentini S., Mastrantonio G., Petenko I., Pietroni I., Viola A. Use of high-resolution sodar to study surface-layer turbulence at night // Boundary-Layer Meteorol. 2012. V. 143, N 1. P. 177–188.
23. Lyulykin V. Braid patterns of Kelvin–Helmholtz billows in sodar return signal: A composite analysis // Ext. Abstr. ISARS2012, 5–8 June 2012, Boulder, Colorado. P. 2704–2711.
24. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. О турбулентном числе Прандтля в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 2. С. 187–196.
25. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. О вихревом перемешивании и энергетике турбулентности в устойчивом атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 666–673.
26. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern

- Recognition. Kauai, HI, USA, December. 2001. V. 1. P. 511–518.
27. *OpenCV* [Electronic resource] / Open Source Computer Vision, 2009–2013. URL: <http://www.opencv.org/> (accessed 18.12.2013).
28. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
29. Freund Y., Schapire R.E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting // J. Comput. System Sci. 1997. V. 55, N 1. P. 119–139.
30. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V. PAMI8, N 6. P. 679–698.
31. Lyulykin V., Kouznetsov R. Features of Kelvin–Helmholtz billows in a stable ABL derived from sodar data: Ext. Abstr. ISARS2012, 5–8 June 2012. Boulder, Colorado. 2012. P. 150–152.

A.P. Kamardin, S.L. Odintsov, A.V. Skorokhodov. **Identification of internal gravity waves in the atmospheric boundary layer from sodar data.**

The paper describes a technique for automatic identification of internal gravity (buoyancy) waves in the atmospheric boundary layer from results of remote acoustic sounding. The technique is based on the analysis of sodar echograms with the use of artificial intelligence and digital image processing methods. The technique is intended for identification of a certain type of manifestation of internal gravity waves in sodar echograms and tested with a great number of experimental data. The periods and amplitudes of internal gravity waves of this type are estimated from a test sample of 72 sodar echograms.

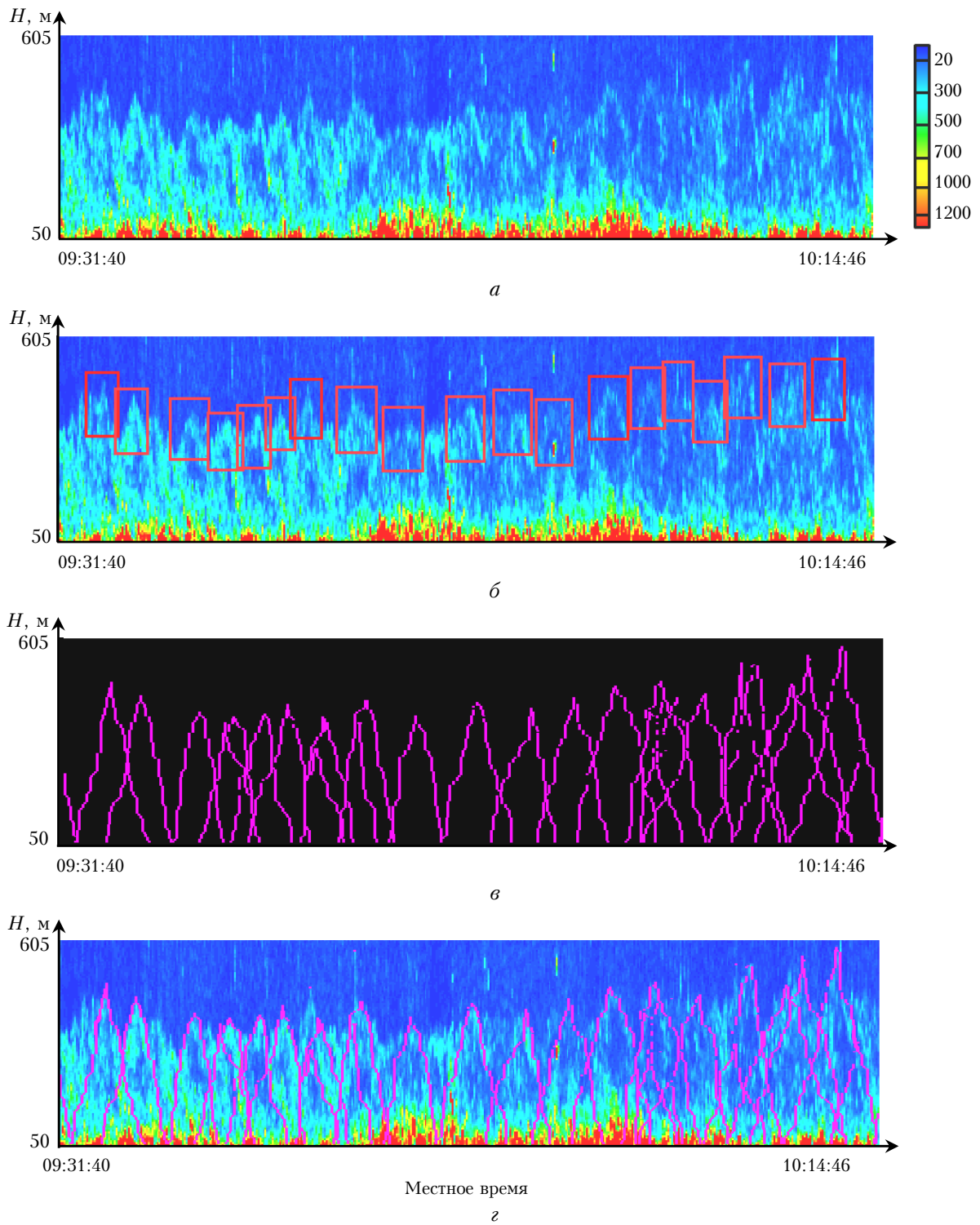


Рис. 3. Исходная эхограмма (*a*), результат обнаружения проявлений ВГВ (выделено прямоугольниками) (*б*), контуры проявлений ВГВ (*в*), наложение контуров на исходную эхограмму (*г*)