

# Визуализация турбулентных неоднородностей для построения профиля скорости ветра

В.В. Дудоров<sup>1</sup>, А.С. Еремина<sup>1</sup>, Ю.Т. Михайлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, пл. академика Зуева 1, Томск, Россия, 634055

<sup>2</sup>ОАО «Пеленг», Макаенка 25, Минск, Республика Беларусь, 220114

**Аннотация.** В работе анализируются возможности использования разработанного нами пассивного метода определения поперечной скорости ветра по видеоряду некогерентных изображений на трассах наблюдения протяженностью до 1 км. Результаты работы метода сравниваются с показаниями измерений анемометров.

## 1. Введение

Преимуществом пассивных методов определения скорости ветра является отсутствие собственных источников излучения, позволяющее не только упростить и удешевить устройство измерения, но и расширить область их применения [1,2]. Суть предлагаемого нами метода определения поперечной скорости смещения турбулентных неоднородностей воздуха заключается в нахождении скорости смещения искажений, вызванных атмосферной турбулентностью, в изображении наблюдаемого объекта на основе корреляции двух (или более) кадров изображения. Данный метод применяется для ситуаций, когда необходимо измерять мгновенное значение скорости ветра на недоступном для контактных измерений участке атмосферы. При обработке анализируемых изображений необходимо отфильтровать информацию о структуре наблюдаемого объекта, т.е. определить, так называемую, карту качества изображения, содержащую информацию лишь об атмосферных искажениях. На основе функционала резкости изображения карту качества можно определить в следующем виде [3,4]:

$$Q(\mathbf{r}, a_k, t) = |\nabla_{\mathbf{r}} I(\mathbf{r}, t)|^2 \otimes K(\mathbf{r}, a_k) \quad (1)$$

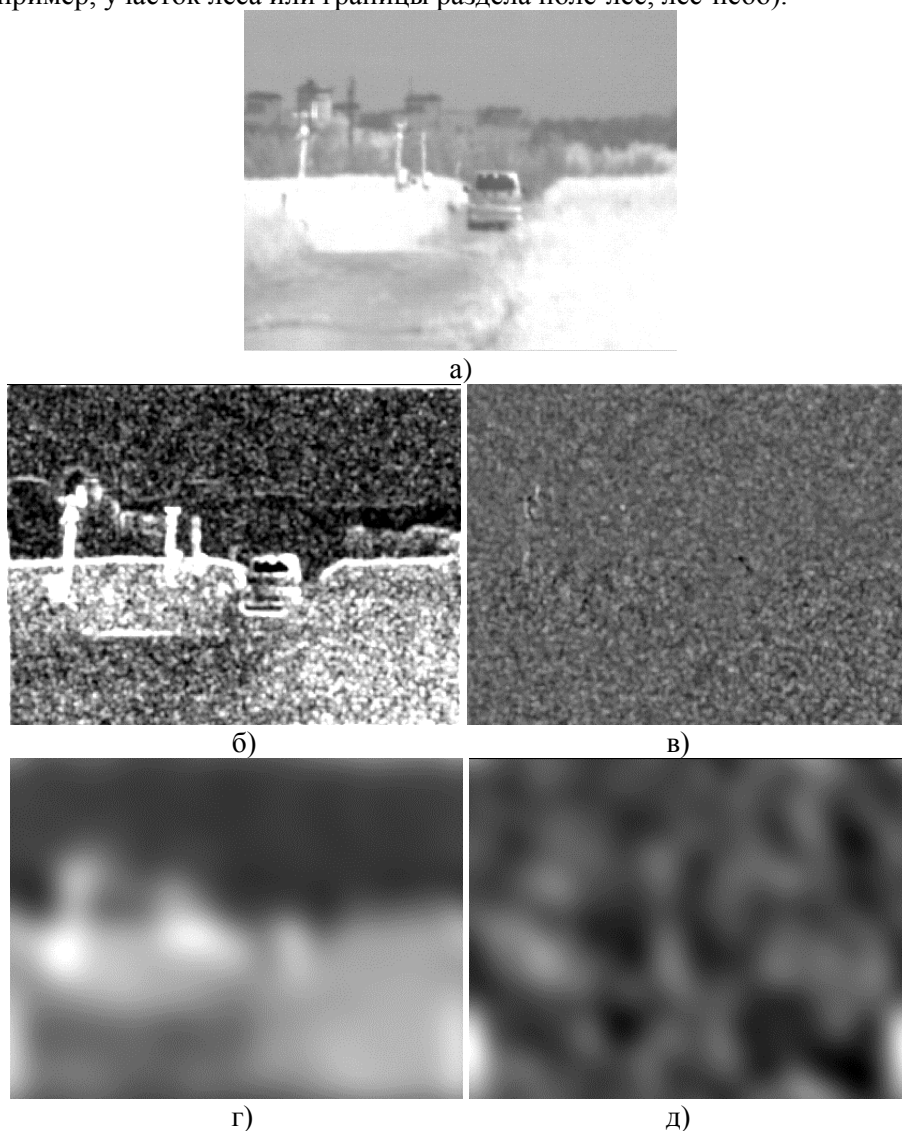
где  $\nabla_{\mathbf{r}} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y}$  - вектор градиент,  $|\nabla_{\mathbf{r}} I(\mathbf{r}, t)|^2$  - функционал резкости изображения,  $a_k$  - коэффициент сглаживания,  $K(\mathbf{r}, a_k)$  - сглаживающая функция, которая задается в виде:

$$K(\mathbf{r}, a_k) = \frac{1}{\pi a_k^2} \exp(-r^2 / a_k^2) \quad (2)$$

## 2. Сравнение результатов работы метода с показаниями анемометров

Для работы данного метода необходимо существенное проявление турбулентности на трассе наблюдения. Так же при работе с реальными сценами важен выбор области наблюдения. Наиболее подходящими для восстановления горизонтального ветра являются фрагменты с

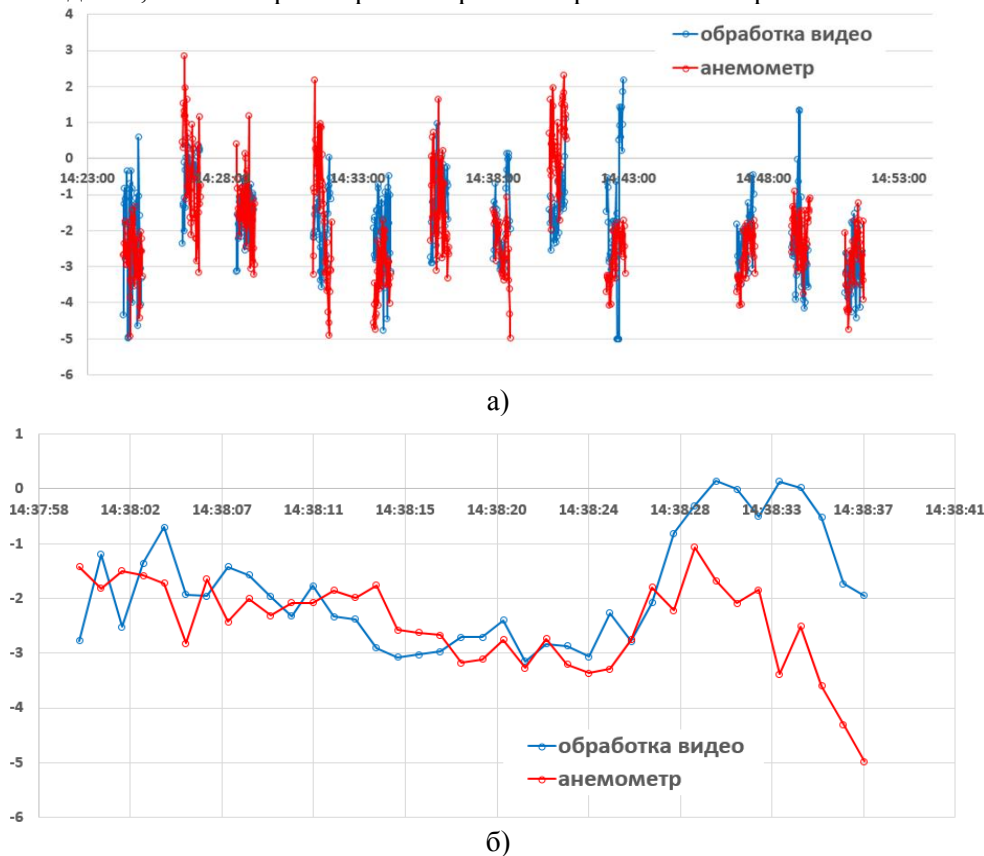
выраженной горизонтальной структурой. На рисунке 1 представлены изображение реальной сцены и карты качества изображения наблюдаемого объекта, рассчитанные по формуле (1) и с дополнительной фильтрацией структуры объекта для различных значений коэффициента сглаживания  $a_k$ . Видно, что изменением параметра  $a_k$  можно управлять характерным размером искажений при анализе их динамики в видеоряде изображений наблюдаемого объекта, с целью выделения участков атмосферы, располагающихся на различном расстоянии от регистрирующей аппаратуры. Наименьшая погрешность в восстановлении поперечной скорости ветра на коротких трассах наблюдалась, когда в качестве фрагмента изображения использовался бампер автомобиля, характеризующийся наличием достаточно протяженных горизонтальных линий. В случае больших расстояний до объекта необходимо анализировать неоднородные фрагменты наблюдаемых сцен без выраженных вертикально ориентированных объектов (например, участок леса или границы раздела поле-лес, лес-небо).



**Рисунок 1.** Изображение (а) наблюдаемого объекта и его карта качества (б-д) для различных значений коэффициента сглаживания  $a_k$ . Слева (б,г) представлена традиционная карта качества изображения (а), справа (в,д) – с дополнительной фильтрацией структуры объекта.

На рисунке 2 представлены результаты расчета скорости ветра для дистанции 322 м. В данном случае значение скорости ветра, восстановленное на основе обработки видеоряда изображений, зарегистрированных видеокamerой, хорошо совпадает с контактными измерениями ветра

анемометром, расположенном посередине. Некоторое различие во временной зависимости можно объяснить, как смещенным (относительно линии визирования) расположением анемометра, так и тем, что в отличие от оптического метода, интегрирующего втер вдоль трассы наблюдения, анемометр измеряет скорость ветра в точке его расположения.



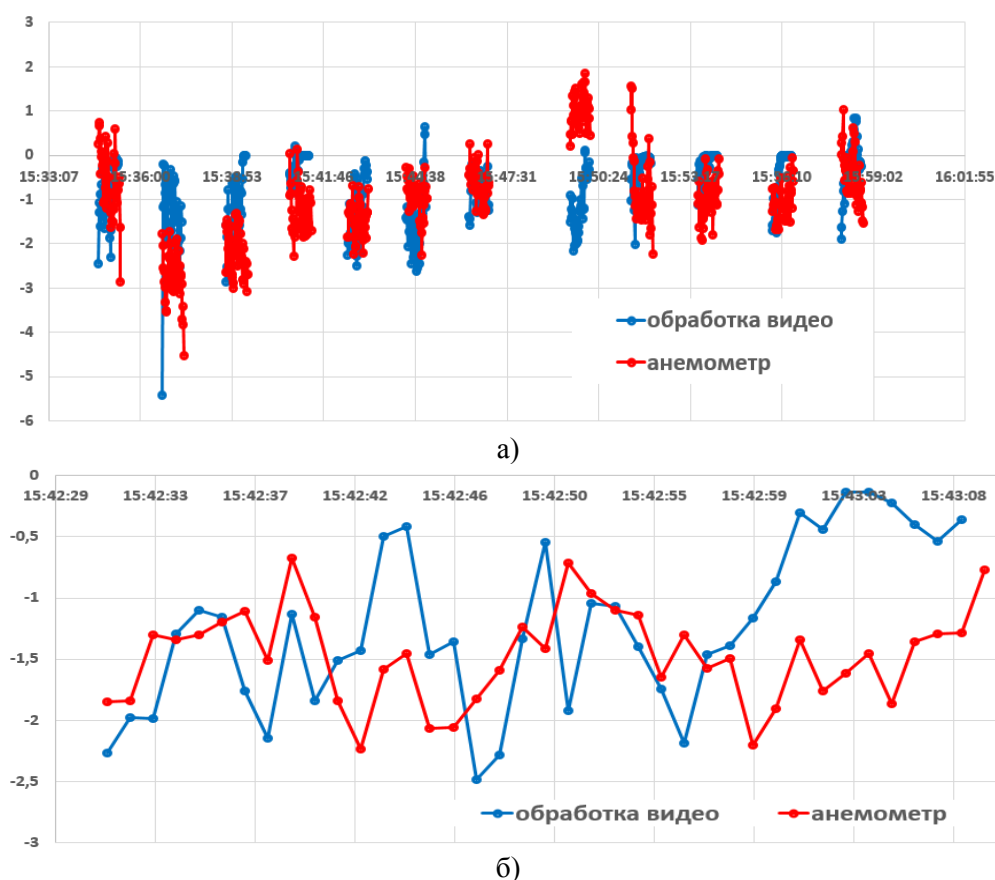
**Рисунок 2.** Результаты восстановления ветра на коротком участке трассы дальностью 322 м. На рисунке (а) представлены результаты за весь рассматриваемый временной промежуток. На рисунке (б) представлен увеличенный интервал времени, представленный на выше (а).

На рисунке 3 представлены результаты расчета скорости ветра при увеличении дистанции до 920 м. В данном случае видно ухудшение совпадения измерений анемометра и результата работы метода. Помимо перечисленных выше возможных факторов, отличие может быть обусловлено уменьшением анализируемой области изображения (угловой размер бампера автомобиля) в связи с увеличением дистанции.

Дальнейшее увеличение дистанции до цели (для дистанции более 1200 метров) делает проблематичным использование горизонтально ориентированных фрагментов изображения цели (бампера) из-за его малого углового размера и соответственно невозможности точно отследить на нем горизонтальное смещение турбулентных искажений.

### 3. Заключение

Анализ результатов восстановления скорости ветра в сравнении с результатами контактных измерений показал, что разработанный метод восстановления скорости ветра позволяет с приемлемой точностью проводить измерения близлежащих к наблюдателю слоев турбулентности, а также среднего ветра для трасс наблюдения до 1 км при использовании коммерчески доступного видео и оптического оборудования. Для увеличения дальности необходимо повышать разрешающую способность систем наблюдения, а также использовать алгоритмы фильтрации турбулентных искажений разного масштаба [4].



**Рисунок 3.** Результаты восстановления ветра на участке трассы дальностью 920 м. На рисунке (а) представлены результаты за весь рассматриваемый временной промежуток. На рисунке (б) представлен увеличенный интервал времени, представленный на выше (а).

#### 4. Литература

- [1] Holmes, R.B. Passive optical wind profilometer / Pat. 5.469.250 US005469250A USA, 1995.
- [2] Belenkii, M. Passive crosswind profiler / Pat. 2010/0128136 A1 USA. USA, 2010.
- [3] Дудоров, В.В. Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 1. Смещение тонкого слоя турбулентных неоднородностей / В.В. Дудоров, А.С. Еремина // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 4. – С. 274-280.
- [4] Дудоров, В.В. Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 2. Смещение объема турбулентной среды / В.В. Дудоров, А.С. Еремина // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 8. – С. 682-690.

#### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-32-00462.

## Visualisation of the turbulent inhomogeneities for passive Crosswind Profiling

V.V. Dudorov<sup>1</sup>, A.S. Eremina<sup>1</sup>, Yu.T. Mikhailov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), Academician Zuev square 1, Tomsk, Russia, 634055

<sup>2</sup>JSC «Peleng», Makayonka str. 25, Minsk, Republic of Belarus, 220114

**Abstract.** Possibilities of using ours the passive method for determination crosswind speed by video sequence of incoherent images on observation paths with a length of up to 1 km are analyzed. The results of the submitted method are compared with the measurements of anemometers.