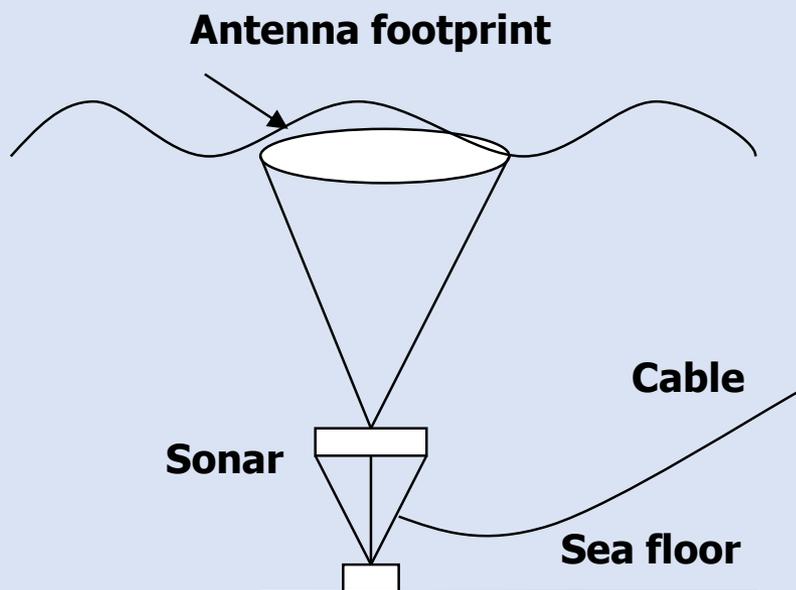




Институт прикладной физики РАН  
Нижний Новгород, Россия

Особенности использования широкой диаграммы направленности антенны в приборах дистанционного зондирования, измеряющих форму импульса, отраженного водной поверхностью



*Титченко Ю.А., Понур К.А., Кареев В.Ю.,  
Мешков Е. М., Ковалдов Д.А.*

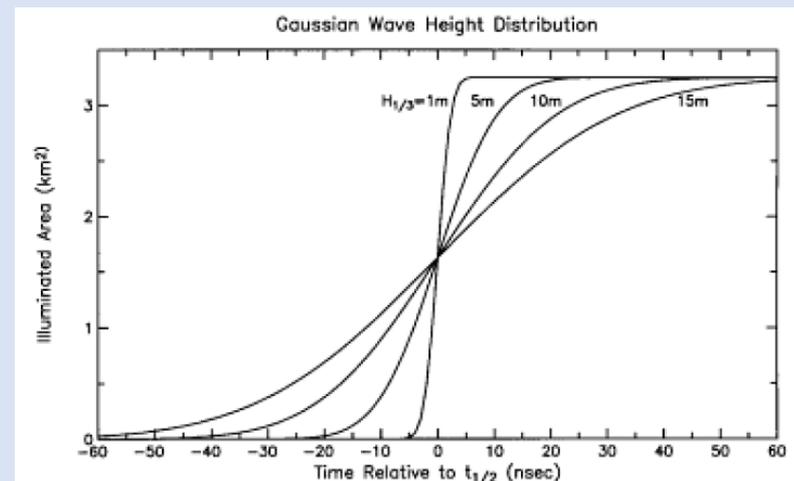
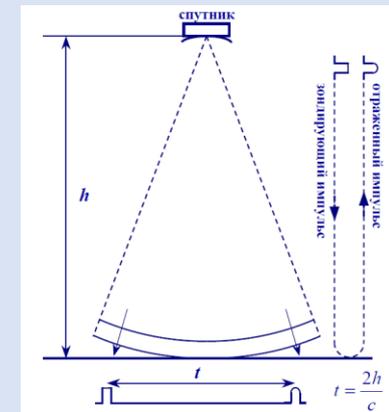
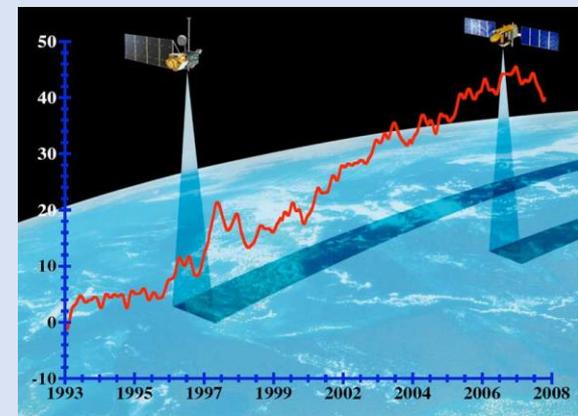
Анализ формы импульса, отраженного водной поверхностью – основа спутниковой альтиметрии.

Альтиметры измеряют высоту волн и уровень океана непрерывно с 1993 года по всему мировому океану.

Традиционный спутниковый альтиметр оборудован приемопередающей антенной с шириной диаграммы направленности по уровню половинной мощности 1,5 градуса. Поэтому задний фронт отраженного импульса не содержит информацию о водной поверхности и его используют только для контроля ориентации антенны.

В данной работе рассматриваются возможности техники анализа отраженного водной поверхностью импульса при использовании в приборах для дистанционного зондирования широких диаграмм направленности излучающей и приемной антенн.

Изменение формы отраженного импульса в зависимости от высоты значительного волнения

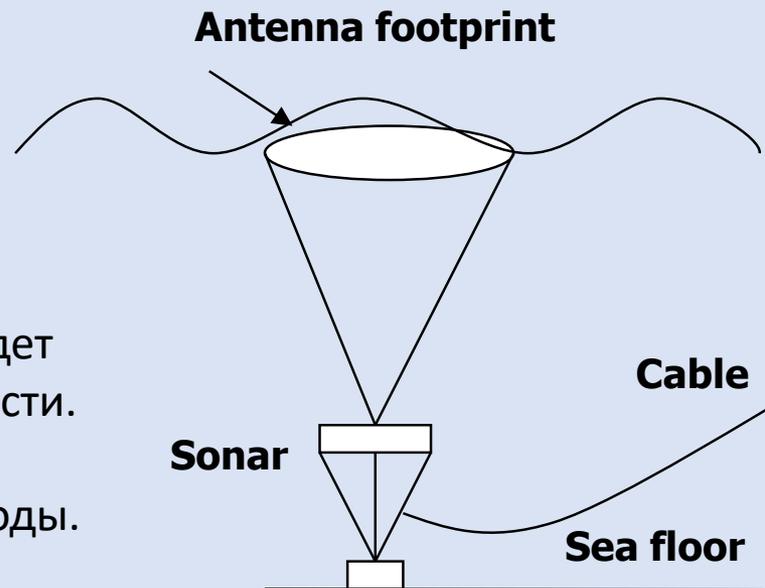


Использование широкой диаграммы направленности антенны позволяет наблюдать отражения от участков водной поверхности, ориентированных под разными углами к вертикали.

В результате задний фронт отраженного импульса будет содержать информацию об уклонах водной поверхности. При этом передний фронт отраженного импульса сохранит информацию о высоте волны и об уровне воды.

На спутниковых альтиметрах не получится использовать широкую диаграмму направленности антенны из-за требований получения заданной энергетике отражений.

Использовать широкую диаграмму направленности антенны можно на самолетных радиоальтиметрах или, например, в подводных сонарах ориентированных вертикально на водную поверхность. В работе рассматривался случай подводного импульсного сонара, расположенного на дне.



# Модель акустического импульса

Учитывая дисперсию уклонов отражающей поверхности ( $\sigma_{xx}^2$  и  $\sigma_{yy}^2$ ) и диаграмму направленности приемо-передающей антенны  $\delta^2$  в приближении касательной плоскости получим:

$$F(\tau) = F_1(\tau) + F_2(\tau) - F_3(\tau), \quad F_i = F_{ix} + F_{iy},$$

$$F_{1x} = 0,5 \cdot \sigma_0 \left( \exp \left[ A_x H_0 \cdot c \tau_p \right] - 1 \right) \times$$

$$\times \exp \left[ -A_x H_0 \cdot c \tau + 2\sigma_\zeta^2 A_x^2 H_0^2 \right] \times \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( A_x H_0 \sqrt{2\sigma_\zeta^2} + \frac{(\tau_p - \tau) \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) \right],$$

$$F_{2x} = 0,5 \cdot \sigma_0 \left( \operatorname{erf} \left( \frac{(\tau_p - \tau) \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{\tau \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) \right),$$

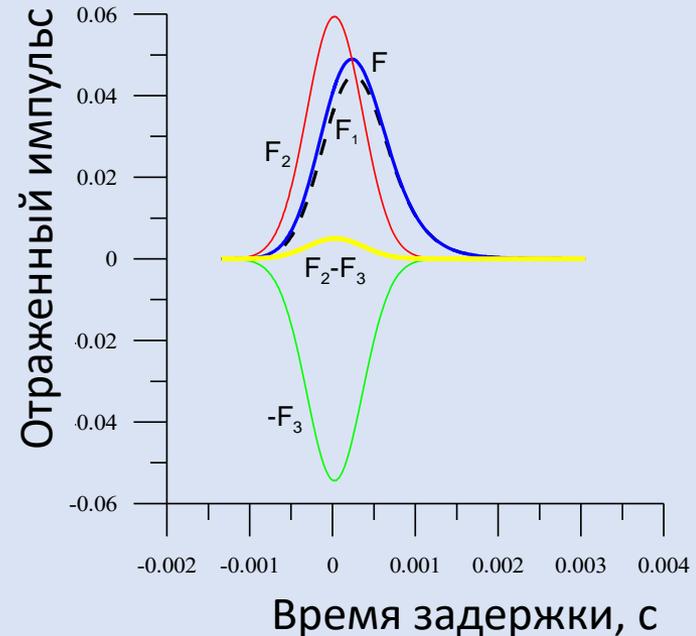
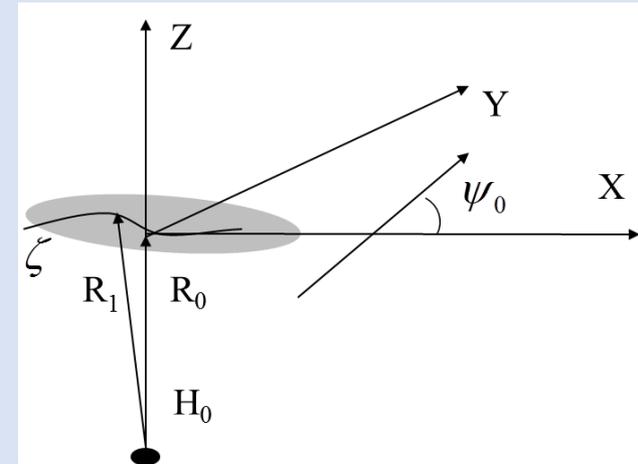
$$F_{3x} = 0,5 \cdot \sigma_0 \exp \left[ -A_x H_0 c \tau + 2\sigma_\zeta^2 A_x^2 H_0^2 \right] \times$$

$$\times \left( \operatorname{erf} \left( A_x H_0 \sqrt{2\sigma_\zeta^2} + \frac{(\tau_p - \tau) \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) - \operatorname{erf} \left( A_x H_0 \sqrt{2\sigma_\zeta^2} - \frac{\tau \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) \right),$$

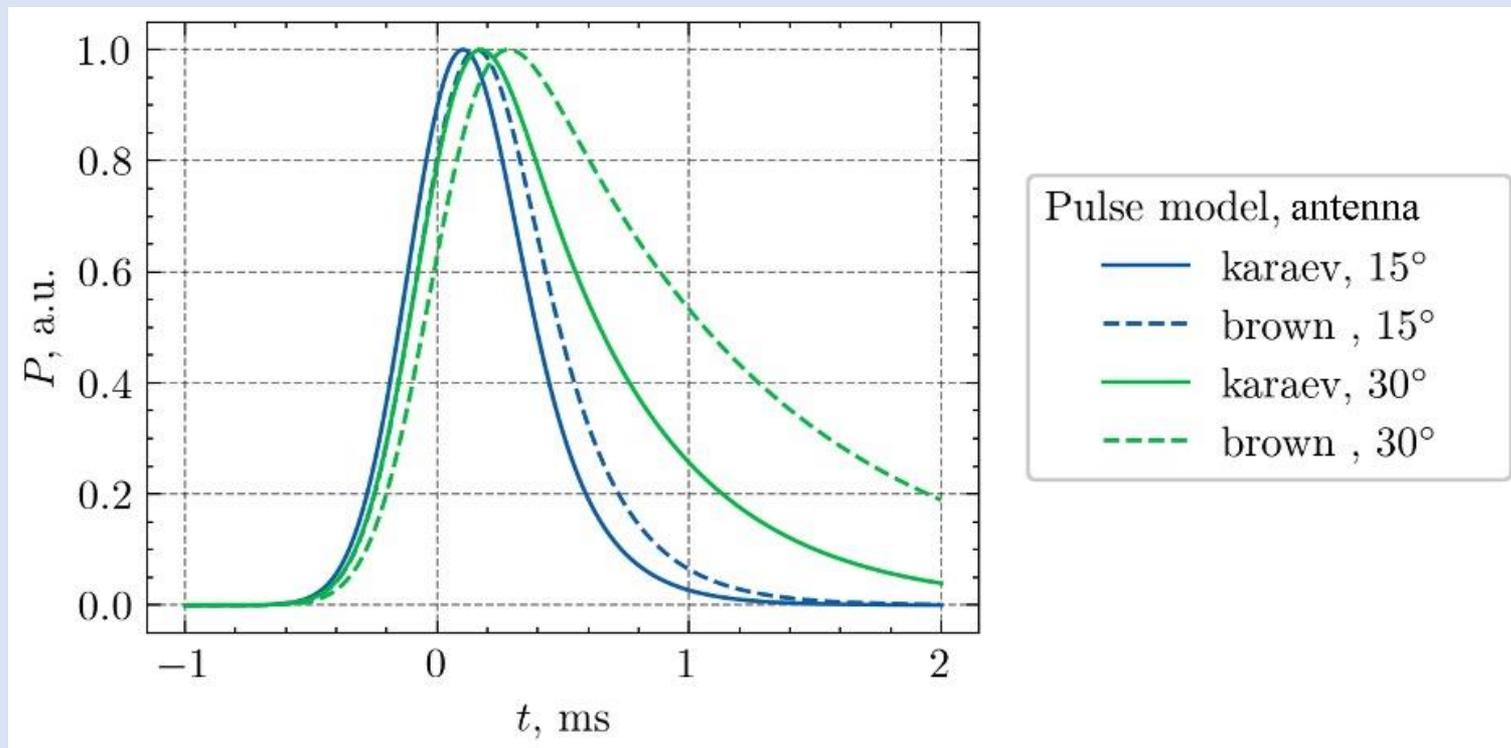
$$\sigma_{0i} = \frac{2,76 \cdot |V_{eff}|^2}{H_0^2 \delta^2 \sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2}},$$

$$A_x = \frac{1}{2\sigma_{xx}^2 H_0^2} + \frac{5,52}{\delta^2 H_0^2}.$$

Дисперсия  
высот

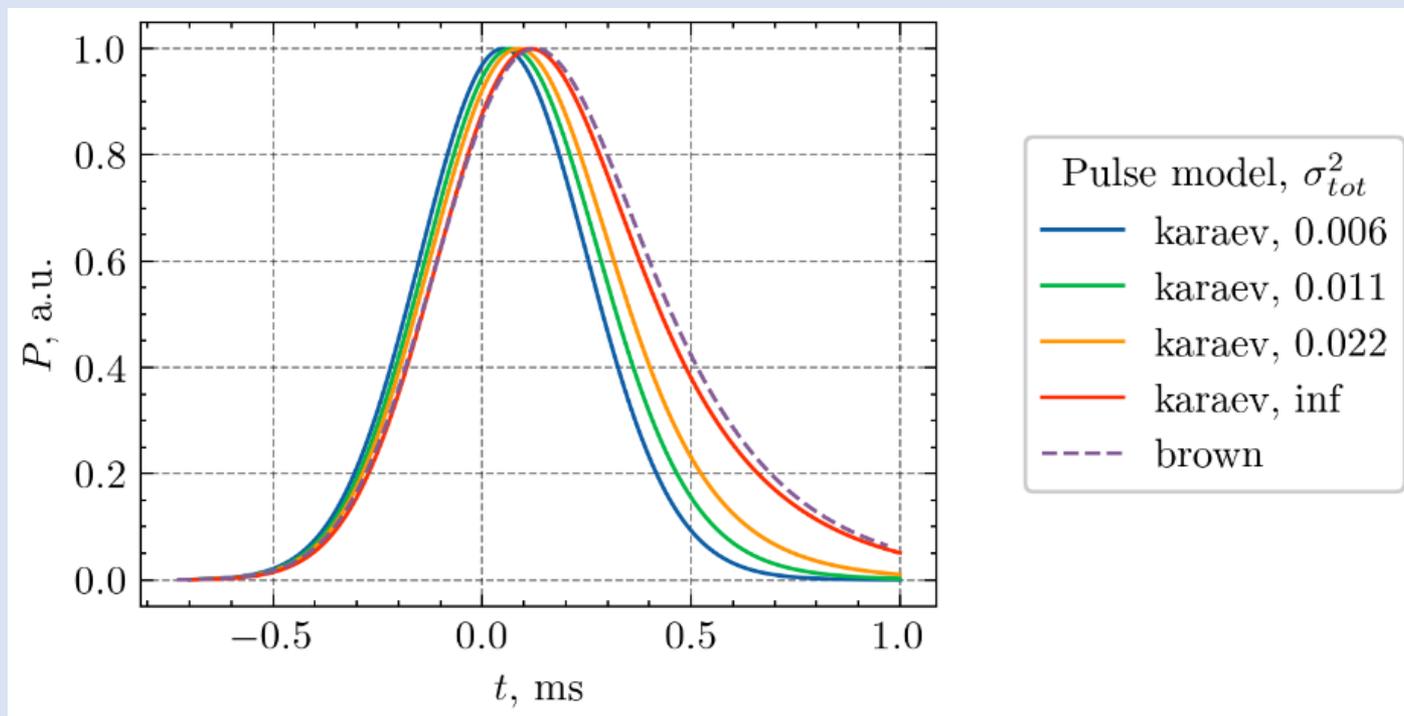


Рассмотрим отражение акустического импульса, излучаемого гидролокатором с длиной волны излучения 8 мм. Сравнение модели Караева и модели Брауна при фиксированной глубине погружения  $h=30$  м, дисперсии уклонов  $\sigma_{tot}^2=0.022$ , высоте значительного волнения  $H_s = 4\sqrt{\sigma_s^2}=0.56$  м,  $\tau_{imp}=60$  мкс для двух диаграмм направленности антенны ( $15^\circ$  и  $30^\circ$ )



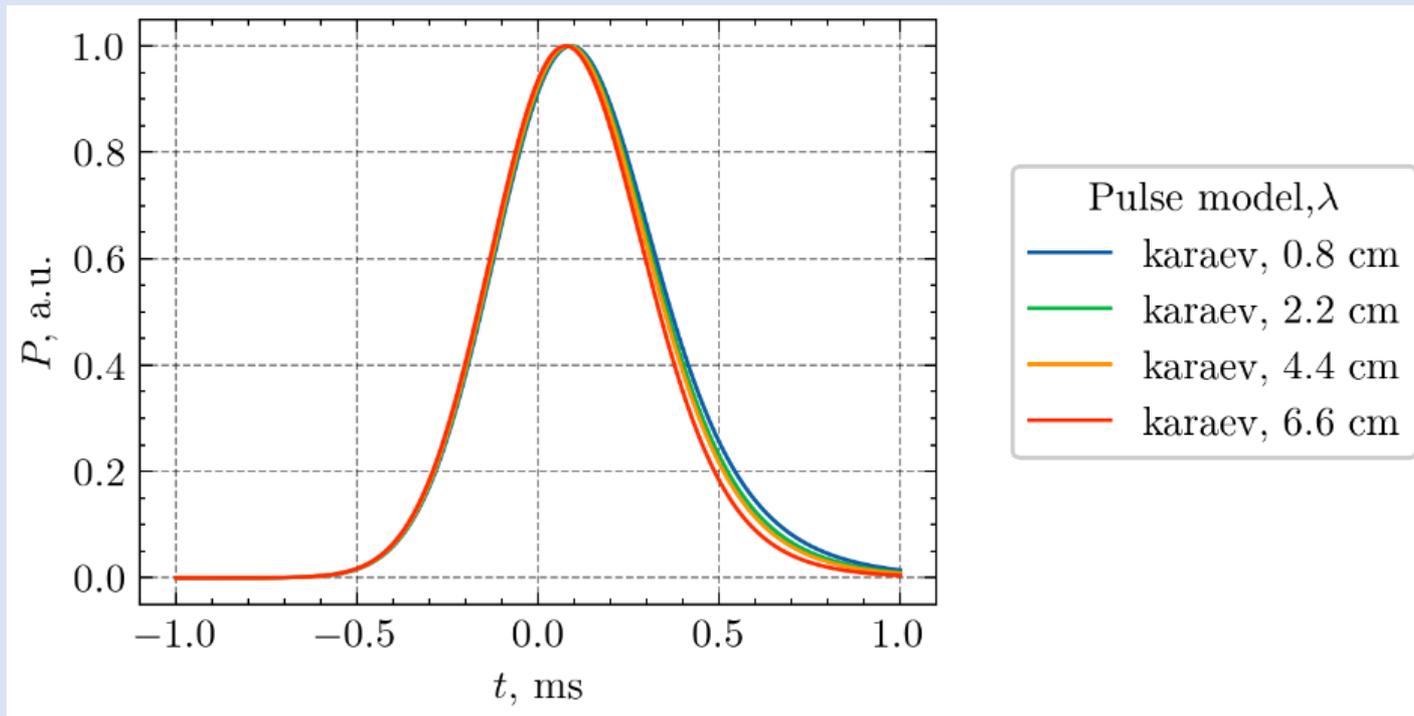
В модель Брауна уклоны не входят, поэтому задний фронт спадает медленнее, чем в модели Караева. В результате по рисунку видно, что при увеличении диаграммы направленности антенны задний фронт импульса модели Караева больше отличается от модели Брауна, что говорит об увеличении чувствительности к дисперсии уклонов.

Сравнение заднего фронта отраженных импульсов при фиксированной высоте значительного волнения 0.56 м, глубине погружения 30 м, ширине диаграммы направленности 15°, но для разных значений полной дисперсии уклонов крупномасштабного волнения. Изменение дисперсии уклонов крупномасштабного волнения не окажет влияния на форму отраженного импульса для модели Брауна.



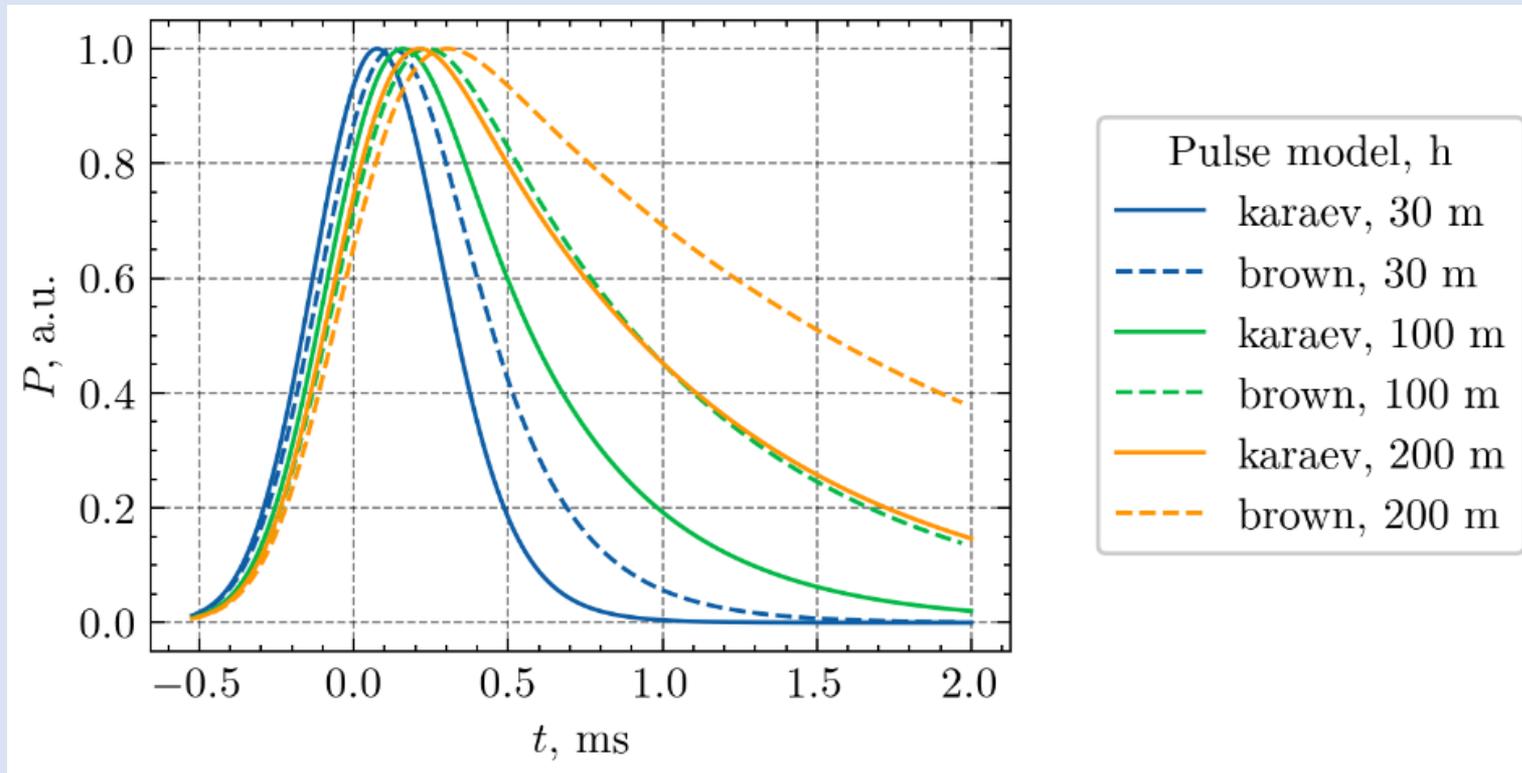
По рисунку видно дисперсия уклонов оказывает влияние на задний фронт отраженного импульса, что позволяет в дальнейшем восстанавливать этот параметр.

Формы отраженных импульсов для разных длин волн излучения при прочих фиксированных параметрах: скорость ветра 5 м/с, высота значительного волнения 0.2 м, длительность излученного импульса 60 мкс, глубина погружения 30 и ширине ДН 15°. В модели Брауна длина волны излучения не влияет на форму отраженного импульса и это не расходится с экспериментами.



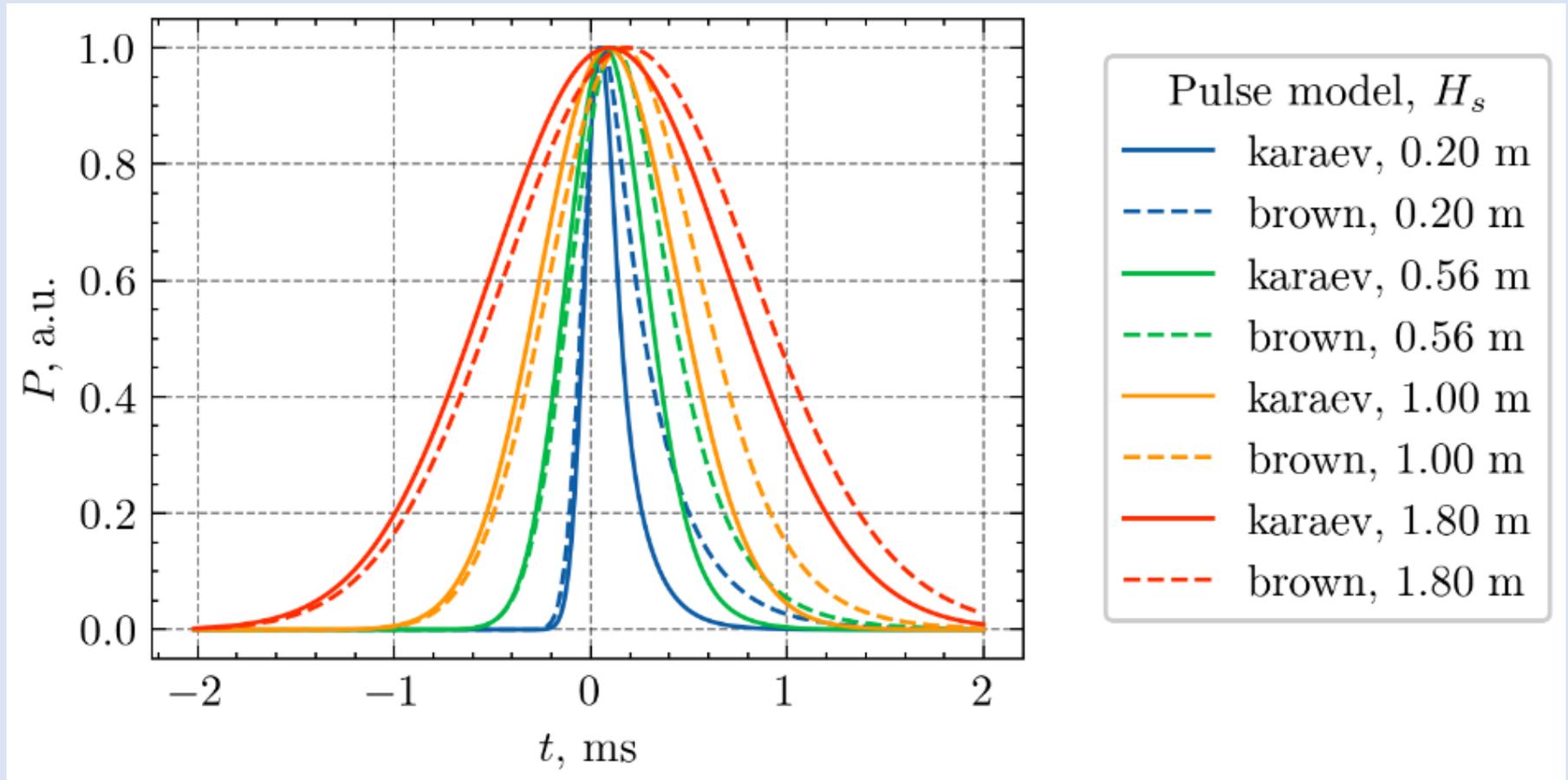
Наблюдаемое различие формы заднего фронта отраженного импульса для разных диапазонов длин волн объясняется различием наблюдаемых дисперсий уклонов рассеивающей поверхности для разных длин волн. В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности граничное волновое число, определяющие границу между крупномасштабным, по сравнению с длиной волны излучения, волнением и мелкомасштабной рябью зависит от длины волны излучения.

Зависимость формы отраженного импульса по моделям Караева и Брауна от глубины погружения акустического волнографа. Зависимости построены при фиксированных параметрах: скорость ветра 5 м/с, высота значительного волнения 0.2 м, длительность излученного импульса 60 мкс, ширина диаграммы направленности 15°.



По рисунку видно, что глубина погружения оказывает существенное влияние на форму отраженного импульса и ее нужно учитывать при восстановлении других параметров водной поверхности. Традиционно в спутниковой альтиметрии дальность до среднего уровня водной поверхности определяют по времени задержки отраженного импульса, так же и тут будет работать тот же подход. По рисунку так же видно, что чувствительность к дисперсии уклонов возрастает с ростом глубины.

Влияние дисперсии высот на форму отраженного импульса по модели Караева и Брауна. Глубина погружения 30 м, ширина диаграммы направленности  $15^\circ$ , дисперсия уклонов 0.022.



По рисунку видно, что чувствительность переднего фронта импульса к дисперсии высот волн одинаковая у обеих моделей. Что позволяет использовать подходы из спутниковой альтиметрии для восстановления дисперсии высот волн в подводном импульсном акустическом волнографе.

## Результаты

- Показано, что использование широкой диаграммы направленности антенны позволяет помимо традиционных дисперсии высот и уровня воды измерять дисперсию уклонов волн.
- Чем больше дальность до уровня невозмущенной водной поверхности и шире диаграмма направленности антенны, тем выше чувствительность отраженного импульса к дисперсии уклонов волн.
- Следует отметить, что несмотря на то, что вычисления выполнялись для акустического волнографа, приведенный подход применим и для радиолокации и может использоваться, например на беспилотных летательных аппаратах или вертолетах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-77-10089)