

УДК 551.558.74: 551.508.95: 528.837

## Решение обратной задачи DIAL-IPDA аэрокосмического лидарного зондирования углекислого газа на основе бионических методов

А.Я. Суханов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 28.02.2017 г.

Рассматривается применение бионических методов, в частности нейронных сетей и генетических алгоритмов, для решения задачи восстановления относительной концентрации парникового газа  $\text{CO}_2$  при зондировании с борта стратосферного аэростата или дирижабля. В качестве сигналов для восстановления используются обратно-рассеянный и отраженный от поверхности Земли сигналы на длинах волн вблизи 1572 нм. Приводятся сравнения ошибок восстановления при использовании стандартного DIAL-подхода и в комбинации с технологией IPDA. Для предложенных технических характеристик лидара средняя ошибка разработанных алгоритмов менее 1 ppm. Применение генетического алгоритма основано на минимизации невязки между модельным представлением сигналов и полученным сигналом. Обучение нейронной сети происходит на примерах моделируемых сигналов (отраженного и рассеянного) и высотном распределении газовой концентрации.

*Ключевые слова:* атмосфера, лидар, углекислый газ, парниковый газ, бионический метод, нейронная сеть, генетический алгоритм; atmosphere, lidar, carbon dioxide, greenhouse gas, bionic method, neural net, genetic algorithm.

### Введение

Возможность зондирования углекислого и других парниковых газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) с борта космической платформы на орбите 400–450 км и длинах волн 1,57; 1,61; 2,05 мкм рассматривалась ранее в [1, 2] и нашей работе [3]. В качестве схемы зондирования предполагалась IPDA (Integral Path Differential Absorption). Оценки погрешностей зондирования [2, 3] включали упрощения, связанные с тем, что ход профиля концентрации  $\text{CO}_2$  остается неизменным по высоте. Дальнейшие исследования дали понять, что ход профиля влияет на ошибку восстановления приповерхностной концентрации углекислого газа. В [3] было показано, что использование нескольких длин волн позволяет увеличить точность измерений концентрации углекислого газа, а также, что возможно незначительное увеличение мощности сигналов при наличии плотных аэрозольных образований вблизи Земли вследствие многократного рассеяния, но оно не влияет на точность восстановления концентрации.

Как отмечается в [1–3], климатические атмосферные модели требуют высокой точности измерения парниковых газов, в том числе для определения их стоков и истоков. Существующие пассивные методы позволяют получать данные либо в дневное время, либо вне полюсов Земли, что ограничивает

область их применения. Кроме того, они обеспечивают измерения среднего содержания газа вдоль всей атмосферной толщи или имеют недостаточно высокое пространственное разрешение, что требует параллельного развития активных методов зондирования с борта космической платформы.

В данной статье рассматриваются IPDA- и DIAL-схемы (Differential Absorption Lidar) зондирования с борта аэростата или стратосферного дирижабля на довольно большой высоте (23 км). Несмотря на то что технология дирижаблестроения часто критикуется как несостоятельная и не оправдывающая себя, в некоторых работах (см., например, [4]) предлагаются проекты стратосферных дирижаблей и других видов аэростатов с питанием на основе солнечных батарей. В работе [5] анализируются перспективы применения воздухоплавательных платформ (дирижаблей) в обеспечении безопасности территорий. Отмечается, что 1 ч эксплуатации стоит несколько сотен рублей, что в тысячи раз дешевле эксплуатации спутников и беспилотников [5, 6], также приводится обоснование перспективности платформ лидаров для обнаружения пожаров.

Технологию измерений со стратосферных высот отраженного от Земли и рассеянного в атмосфере сигналов можно рассматривать независимо от борта носителя как основу для создания будущих космических лидаров, лидаров для валидационных измерений и регионального мониторинга. Зарубежными коллегами делаются подобные системы, в том числе и многоволновых лидаров [7–12].

\* Александр Яковлевич Суханов (say@iao.ru).

В настоящей работе рассмотрены две схемы измерения концентрации CO<sub>2</sub>: IPDA и DIAL, а также их комбинация. Для оценки ошибок решалась прямая задача в приближении однократного рассеяния. Для решения обратной задачи использовались бионические методы и стандартные методы с применением сглаживания.

Бионика — прикладная наука о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы. В нашей статье применяются математические модели нейронных сетей и заимствованный у природы эволюционный принцип приспособляемости живых организмов — математический аналог генетического (естественного) отбора для получения наиболее подходящего решения в задачах оптимизации.

В качестве сигналов для восстановления концентрации CO<sub>2</sub> используются обратно-рассеянный в атмосфере и отраженный от поверхности Земли сигналы. Применение генетического алгоритма основано на минимизации невязки между модельным представлением сигнала и полученным сигналом. Обучение нейронной сети осуществляется на примерах моделируемых сигналов (отраженного и рассеянного) и высотном распределении газовой концентрации. Преимущество бионических методов в данном случае связано с возможностью совместить разные виды сигналов, обычно используемых в различных методах решения обратных задач. В частности, DIAL-сигналы обрабатываются отдельно с помощью сглаживания и дифференцирования, а IPDA-сигналы используются в решении интегрального уравнения при условии знания поведения дифференциального коэффициента поглощения или весовой функции. В случае применения нейронной сети и генетического алгоритма используются два вида сигналов для повышения точности решаемой задачи.

## 1. DIAL-IPDA-методики лидарного зондирования и уравнения для решения прямой и обратной задач

### 1.1. Уравнение для DIAL-зондирования

Стандартное уравнение лазерной локации в приближении однократного рассеяния имеет следующий вид:

$$P_{\lambda}(z) = \frac{E_{\lambda}\eta_{\lambda}G(z_a - z)A\Delta z}{(z_a - z)^2\Delta t_L}\beta_{\lambda}^{\pi}(z) \times \exp\left(-2\int_z^{z_a}\sum_{i=1}^n c_i(z')\alpha_{\lambda,i}(z') + \alpha_{\lambda}^{sct}(z') + \beta_{\lambda}^{ext}(z')dz\right), \quad (1)$$

где  $E_{\lambda}$  — энергия лазерного импульса на данной длине волны;  $\eta_{\lambda}$  — пропускание приемной системы на заданной длине волны;  $G(z_a - z)$  — геометрический фактор лидара;  $A$  — площадь приемной системы;  $\Delta z = \frac{c\Delta t_L}{2}$  — длина строка зондирования;  $\Delta t_L$  —

длительность лазерного импульса;  $\beta_{\lambda}^{\pi}(z)$  — коэффициент обратного рассеяния на высоте  $z$  и длине волны  $\lambda$ ;  $c_i(z')$  — концентрация данного газа;  $\alpha_{\lambda,i}(z')$  — коэффициент поглощения газа;  $\alpha_{\lambda}^{sct}(z')$ ,  $\beta_{\lambda}^{ext}(z')$  — коэффициенты молекулярного рассеяния и аэрозольного ослабления.

При зондировании на двух длинах волн два сигнала делятся друг на друга и восстановление концентрации газа осуществляется из выражения

$$c_k(z) = -\frac{1}{\Delta\alpha_k(z)}\left(\frac{d}{2dz}\ln\frac{P_{on}(z)\beta_{off}^{\pi}(z)P_{off}\eta_{off}}{P_{off}(z)\beta_{on}^{\pi}(z)P_{on}\eta_{on}} - \sum_{i=1, i \neq k}^n c_i(z)\Delta\alpha_i(z) - \Delta\alpha^{sct}(z) - \Delta\beta^{ext}(z)\right) \quad (2)$$

( $\Delta$  — разность между коэффициентами на длинах волн *on* и *off*;  $P$  — мощность сигнала). По первому члену данного уравнения проводится дифференцирование, что является некорректной задачей в случае зашумления сигнала и требует предварительного сглаживания дифференцируемой функции.

### 1.2. Учет шумов

Далее рассмотрим модель шумов, используемую для расчета модельных сигналов и оценки качества методов решения обратных задач.

Устройства аналогового или прямого детектирования напрямую преобразуют поток фотонов, падающий на поверхность детектора, в измеряемый ток сигнала. Для учета шумов можно воспользоваться отношением сигнал-шум SNR, которое для устройств прямого детектирования при большом количестве импульсов накопления близко к отношению ток-шум CNR.

Среднее CNR для каждой длины волны может быть посчитано по формуле

$$\text{CNR} = \frac{PMR}{\sqrt{\langle\Delta I_N^2\rangle}}\sqrt{N_{imp}}. \quad (3)$$

Здесь  $P$  — мощность обратного сигнала (без учета фона);  $M$  — коэффициент усиления детектора;  $R$  — чувствительность детектора,  $A \cdot \text{Вт}^{-1}$ ;  $N_{imp}$  — количество импульсов накопления. Средние флуктуации тока можно определить следующим образом:

$$\langle\Delta I_N^2\rangle = B\left(2eM^2FR(P + P_b) + i_D^2 + i_0^2 + \frac{4k_bT}{R_F} + \left(\frac{u_0}{R_F}\right)^2\right) + \frac{B^3}{3}(u_0 2\pi C_d)^2, \quad (4)$$

где  $B$  — электрическая полоса пропускания;  $e$  — элементарный заряд электрона;  $F$  — фактор избыточного шума, обусловленный внутренними свойствами усилителя;  $i_D^2$  — плотность темнового тока;  $R_F$  — сопротивление с обратной связью;  $i_0^2$  — плотность шума входного тока;  $k_b$  — константа Больцмана;  $T$  — абсолютное значение температуры;  $u_0^2$  — плотность

шума входного напряжения;  $C_d$  – эквивалентная емкость детектора, включая емкость усилителя и проводки;  $P_b$  – фоновый сигнал, обусловленный рассеянным и отраженным солнечным излучением или термическим излучением в спектральном диапазоне приема полностью не устраненными фильтрами.

Отраженный фоновый сигнал можно упрощенно рассчитать по формуле

$$P_b = L_e S \frac{A}{(z_a)^2} \rho \Theta(z_a) \Delta\lambda + \int_{z_0}^{z_a - \Delta z'} L_e S(z) \frac{A}{(z_a - z)^2} \beta_\alpha(z) \Theta(z_a - z) \Delta\lambda dz. \quad (5)$$

Здесь  $L_e$  – энергетическая яркость падающего на Землю солнечного излучения, 0,005–0,25 Вт/(м<sup>2</sup>·нм);  $S$  – площадь пятна, охватываемого приемником;  $\rho$  – коэффициент отражения Земной поверхности (для диапазонов длин волн 1,5–1,6 мкм данная величина для поверхности типа суша/море берется равной 0,08/0,33 ср<sup>-1</sup>);  $\Delta\lambda$  – ширина полосы пропускания фильтра приемника;  $\Theta(z_a)$  – оптическое пропускание на трассе в заданном диапазоне длин волн;  $\beta_\alpha(z)$  – рассеяние в направлении приемника;  $\Delta z'$  – расстояние отсечки сигнала,  $z_a$  – высота лидарной платформы. Следует учесть, что при сильном дневном солнечном излучении велики фоновые шумы. Потому можно в дальнейшем предусмотреть увеличение высоты размещения аппарата (это сопряжено с необходимостью решения проблемы больших скоростей ветра на таких высотах) либо проводить зондирование в вечернее или ночное время (для Сибирского региона, где длительность дневных суток ограничена, такая технология может себя оправдать). Дневные измерения в глобальном масштабе в основном обеспечиваются пассивными методами. Преимущество высокоорбитальных систем связано с относительным снижением уровней фоновых шумов, хотя и при значительном уменьшении уровня полезного сигнала. Также для уменьшения уровня фоновых помех необходимо использовать фильтры с узкой полосой пропускания, например перейти от фильтра шириной 1 нм к фильтру с шириной полосы пропускания 0,5 нм и менее, или использовать в DIAL-схеме бóльший размер высотного интервала накопления рассеянного сигнала, сузить угол обзора приемника и расходимость пучка излучателя.

### 1.3. Уравнение для IPDA-зондирования

Уравнение лазерной локации в случае отражающего объекта несколько изменит свою форму и примет вид

$$P(\lambda_i, z_a) = \frac{E_0(\lambda_i)}{\Delta t_{eff}} D'(\lambda_i) \frac{d\rho(\Omega, \lambda_i)}{d\Omega z_a^2} \exp \left[ -2 \int_{z_0}^{z_a} \sigma_{ext}(\lambda_i, z) dz \right], \quad (6)$$

где вместо объемного коэффициента обратного рассеяния  $\beta_\alpha(\lambda_i, z)$  появляется величина дифференци-

ального альbedo  $\frac{d\rho(\Omega, \lambda_i)}{d\Omega}$  (ср<sup>-1</sup>), характеризующего

энергетическое и угловое распределения отраженного оптического сигнала,  $\Omega$  – телесный угол. Здесь  $E_0(\lambda_i)$  – энергия излучения в импульсе на длине волны  $\lambda_i$ ;  $D'(\lambda_i)$  – аппаратная функция. В приближении идеальной ламбертовской поверхности в ряде случаев допустимо использование упрощенной функции  $\frac{d\rho(\Omega, \lambda_i)}{d\Omega} = \rho(\lambda_i)/\pi$ , где  $\rho(\lambda_i)$  –

альbedo мишени. При обработке сигнала, отраженного от плотной мишени, заметную роль в выражении (6) приобретает параметр  $\Delta t_{eff}$ , учитывающий распределение отраженного импульса во времени. В общем случае этот параметр зависит от длительности лазерного импульса  $\Delta t_L$ , времени отклика детектора на импульс  $\Delta t_D = 1/(3\Delta B)$ , где  $B$  – электрическая полоса пропускания приемоусилительной системы, и времени расширения импульса  $\Delta t_T$ , обусловленного структурой поверхности. Для аналитического описания данных эффектов уширения традиционно используется распределение Гаусса, а эффективная длина импульса находится на основании теоремы конволюции как геометрическая сумма индивидуальных полуширин:  $\Delta t_{eff} = \sqrt{\Delta t_L^2 + \Delta t_D^2 + \Delta t_T^2}$ , где  $\Delta t_T = 2\Delta h/c$ ,  $\Delta h$  – эффективная высота мишени в пределах пятна импульса (наклон поверхности по отношению к нормали падения лазерного луча),  $c$  – скорость света.

Из (6) непосредственно следует интересующее нас значение дифференциальной оптической толщи, обусловленной концентрацией измеряемого газа:

$$\delta\tau_g = \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{P(\lambda_i, z_a)}{P(\lambda_0, z_a)} + \ln \frac{E_0(\lambda_i)}{E_0(\lambda_0)} + \ln \frac{\rho(\lambda_i)}{\rho(\lambda_0)} - 2(\delta\tau_{int} + \delta\tau_\Sigma) \right], \quad (7)$$

где  $\delta\tau_{int} + \delta\tau_\Sigma$  – дифференциальные оптические толщи, обусловленные аэрозольным ослаблением и поглощением другими газами.

В традиционных трассовых измерениях обычно ограничиваются оценкой средней концентрации загрязняющих или парниковых газов

$$\bar{n}_g = \frac{1}{L} \int_0^L n_g(h) dh = \frac{\delta\tau_g}{2L\Delta k_i}, \quad (8)$$

где  $\Delta k_i$  – дифференциальный коэффициент поглощения газа. Но для ситуации зондирования по высотам, когда коэффициент меняется по высоте от давления и высоты, данная формула не подходит.

Для оценки концентрации на определенной высоте можно воспользоваться средним ходом профиля концентрации и следующим приближением:

$$n_g(z) = \frac{\delta\tau_g}{2 \int_{z_0}^{z_a} \bar{n}(z) p(z) \Delta k_g(z) 10^{-6} dz}, \quad (9)$$

где  $\bar{n}(z)$  – средний профиль концентрации газа;  $p(z)$  – давление на высоте  $z$ ;  $\Delta k_g(z)$  – дифференциальный коэффициент поглощения.

## 2. Результаты моделирования и решение обратной задачи с помощью стандартных методов

Как и в работах [1–3], рабочие длины волн для зондирования CO<sub>2</sub> выбраны в районе 1,572 мкм, в частности 1572,025 в качестве длины волны *on* и 1572,185 нм в качестве длины волны *off*. Выбор данных длин волн обоснован в этих же работах.

Параметры лидарной системы, для которой проводился расчет, приведены в таблице; они были выбраны в соответствии с работами [2, 3] исходя из того, что погрешность измерений составляет в этом случае порядка 0,5–2 ppm для различных высот.

Параметры лидарной системы

Параметр	Значение
Коэффициент усиления детектора $M$	20
Квантовая эффективность $Q$	0,8
Полоса пропускания $B$ , МГц	3
Чувствительность детектора $R = \frac{Qe}{hv}$	1,012
Длительность импульса лазера $\Delta t_L$ , нс	67
Энергия импульса $E_\lambda$ , $E_0$ , Дж	0,1
Угол расхождения лазерного излучения $\mu_L$ , мрад	0,1
Угол приемника $\mu_r$ , мрад	1
Фактор избыточного шума $F$	4,3
Плотность темного тока $i_D$ , фА/Гц <sup>0,5</sup>	160
Плотность шума входного тока усилителя $i_0$ , фА/Гц <sup>0,5</sup>	4
Плотность напряжения входного тока усилителя $u_0$ , нВ/Гц <sup>0,5</sup>	3
Абсолютная температура $T$ , К	290
Сопротивление $R_F$ , МОм	1
Эквивалентная емкость системы детектора $C_{det}$ , пФ	4
Высота $z_a$ , км	23
Площадь приемного телескопа $A$ , м <sup>2</sup>	0,5
Количество импульсов накопления $N_{imp}$	10000
Ширина фильтра $\Delta\lambda$ , нм	1
Коэффициент отражения $\rho$ , ср <sup>-1</sup>	0,08
Энергетическая яркость солнечного излучения $L_e$ , мВт/(м <sup>2</sup> · нм)	5
Длина строба DIAL $\Delta z$ , м	10
Интервал высотной сетки, м	100

Для оценки погрешностей измерения по DIAL-схеме решались прямая и обратная задачи с предварительным сглаживанием дифференцируемого сигнала. В качестве шумовой помехи был взят гауссов шум со среднеквадратичным отклонением, равным уровню сигнала, деленному на SNR.

Моделировались различные атмосферные ситуации поведения профилей концентрации CO<sub>2</sub>

с учетом измерений [13], а также данных по давлению и температуре за несколько лет (2014–2016 гг.) атмосферной модели NRLMSISE-00 Model 2001, базирующейся на моделях MSISE90 и MSIS-86 [14, 15] той же группы авторов. Для других газов была взята стандартная модель ИОА [16]. В качестве оптической аэрозольной модели использовалась модель Крекова–Рахимова. Поведение профилей газовой концентрации CO<sub>2</sub> и отклонения от среднего показаны на рис. 1.

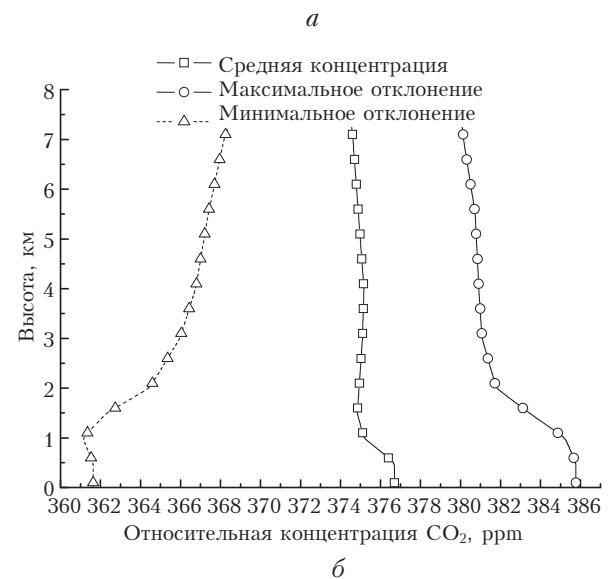
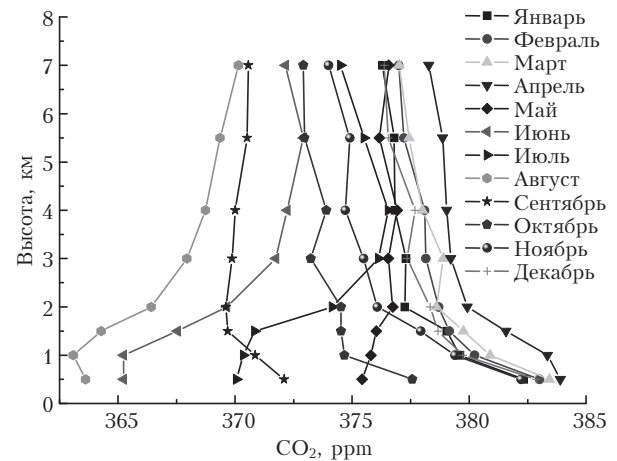


Рис. 1. Примеры профилей газовой концентрации CO<sub>2</sub> (а) и отклонения от средней концентрации (б)

Для указанного случая приводятся средние и максимальные ошибки расчета концентрации углекислого газа в соответствии с формулами (2), (9) (рис. 2). Для сглаживания логарифма двух сигналов *on* и *off* двукратно применялось скользящее среднее с размером окна 8 (в данном случае это давало наиболее стабильное и точное решение по сравнению с другими размерами окон). Предполагается, что профиль давления известен точно. Видно, что на приземных высотах максимальная ошибка может быть больше 5 ppm, на высотах 3–7 км – меньше

2 ppm и средняя ошибка — меньше 0,5 ppm; на приземных высотах для IPDA средняя ошибка составляет порядка 2 ppm. Если в качестве профиля CO<sub>2</sub> брать профиль, совпадающий по высотному ходу с профилем, для которого получен модельный тестовый сигнал, то ошибка будет много меньше 2 ppm.

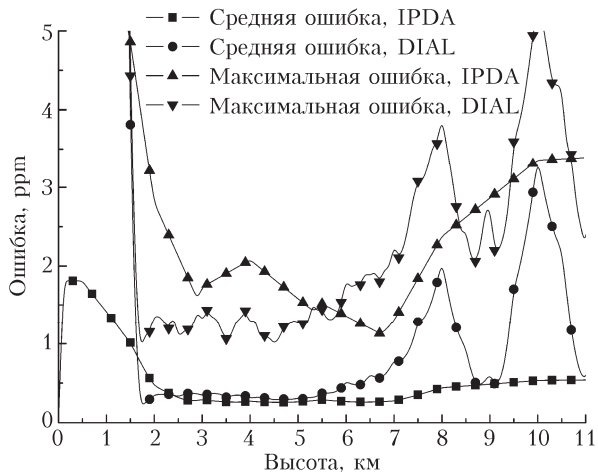


Рис. 2. Максимальные и средние ошибки восстановления относительной концентрации CO<sub>2</sub>

Таким образом, знание высотного хода профиля концентрации может существенно снизить ошибку, что не было учтено в работах [2, 3].

### 3. Восстановление профиля концентрации углекислого газа с помощью генетического алгоритма

Как известно, генетический алгоритм относится к эволюционным бионическим методам решения задач оптимизации. Он основан на эвристическом предположении о том, что при селекции лучших вариантов решений и проведении математических аналогов биологического скрещивания и мутации будет получено наилучшее решение и, предположительно с высокой вероятностью, глобальный оптимум. Для знакомства с генетическим алгоритмом направим читателя к нашим предыдущим работам [17, 18] и к работе автора алгоритма [19]. В качестве основного способа выбора решений для скрещивания используется выборка двух решений из популяции, для которых функция подгонки (функция, используемая для селекции, фитнес-функция) меньше среднего значения в популяции. При выполнении операции отбора из популяции удаляется любая особь со значением функции подгонки, больше среднего значения. Количество особей в популяции 20.

Сама функция подгонки рассчитывается следующим образом.

Для случая IPDA

$$\Phi(\bar{\rho}, n_s) = \left( \delta\tau_g - 2 \int_{z_0}^{z_a} \left( \sum_{i=0}^n \rho_i \tilde{n}_i(z) + n_s \right) p(z) k_g(z) 10^{-6} dz \right)^2, \quad (10)$$

где  $(\bar{\rho}, n_s)$  — искомая особь, или решение;  $\tilde{n}_i(z)$  — базовые профили относительной концентрации CO<sub>2</sub>;  $n_s$  — смещение профиля в пределах [-2; 2] ppm;  $\bar{\rho}$  — вектор весовых коэффициентов (нормируется на единицу).

Для учета DIAL-сигналов предлагается следующая функция подгонки с учетом шума в DIAL-сигнале:

$$\begin{aligned} \varphi_{z,j}(\bar{\rho}, n_s) &= \\ &= \left( \delta\tau_{g,j} - 2 \int_{z_{d,j}}^{z_a} \left( \sum_{i=0}^n \rho_i \tilde{n}_i(z) + n_s \right) p(z) k_g(z) 10^{-6} dz \right)^2; \\ \Phi_{dial}(\bar{\rho}, n_s) &= \Phi(\bar{\rho}, n_s) + \sum_{j=1}^{N_z} \begin{cases} \varphi_{z,j}(\bar{\rho}, n_s), & \varphi_{z,j}(\bar{\rho}, n_s) \leq \varepsilon_j; \\ \varepsilon_j & \varphi_{z,j}(\bar{\rho}, n_s) > \varepsilon_j, \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\varepsilon_j$  — уровень квадрата ошибки дифференциальной оптической толщины на высоте получения сигнала  $j$ ;  $N_z$  — количество высот, с которых получен сигнал.

Необходимость учета ошибки DIAL-сигнала обусловлена тем, что в нем уровень шума гораздо выше, чем относительный уровень шума в отраженном от Земли сигнале, и поэтому его информативность ниже; подгонка под шум DIAL-сигнала нивелирует большую информативность отраженного сигнала. Если этот шум не учитывать, то ошибка восстановления при совместном использовании DIAL и IPDA или только DIAL будет выше, чем при использовании даже просто IPDA-сигнала. В общем случае желательно учитывать уровень шума с помощью коэффициента приоритета в слагаемых выражения (11). В нашей работе рассматривается вариант, указанный в выражении (11), а значит, необходимо знать уровень ошибки оптической толщины на каждой высоте.

Ошибки восстановления профилей концентрации приведены на рис. 3 для первого случая восстановления по отраженному IPDA-сигналу (рис. 3, а) и второго случая — по отраженным IPDA- и рассеянным DIAL-сигналам с учетом их уровня шума (рис. 3, б), а также для случая, когда используется только DIAL-сигнал (рис. 3, в). Здесь также предполагается, что профиль атмосферного давления известен. Ошибка при применении генетического алгоритма ниже, чем при применении стандартных подходов, но генетический алгоритм проигрывает в скорости работы. При этом очевидно, что с учетом IPDA- и DIAL-сигналов ошибка восстановления на приземных высотах меньше, чем при использовании только отраженного от Земли сигнала либо только DIAL-сигналов. Кроме того, в случае учета только DIAL-сигнала на некоторых высотах и для некоторых модельных примеров ошибка может быть значительна, хотя в среднем она не так велика. При этом необходимо знание погрешности оптической толщины на каждой высоте, что не всегда возможно.

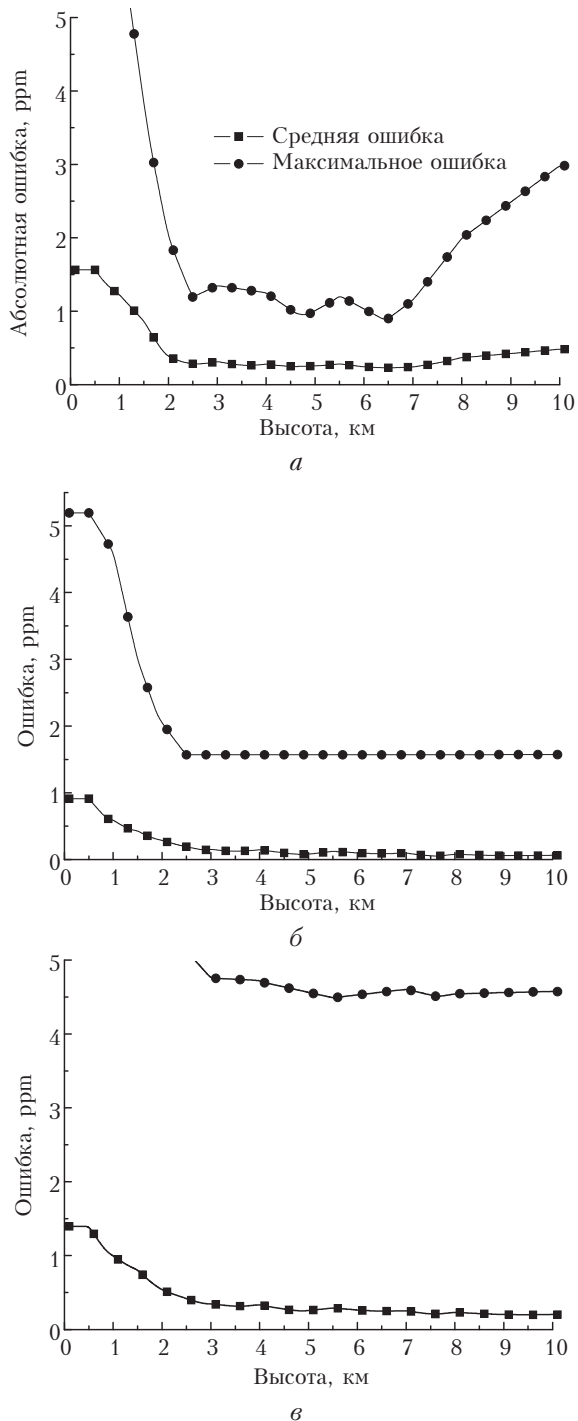


Рис. 3. Ошибка восстановления концентрации CO<sub>2</sub> с учетом только сигнала IPDA на основе формулы (10) (а), с учетом как DIAL-, так и IPDA-сигналов на основе формулы (11) (б); с учетом только DIAL-сигналов (в)

#### 4. Восстановление профиля концентрации углекислого газа с помощью нейронных сетей

Технологию нейронных сетей, используемую нами в задачах лидарного зондирования, также относят к бионическим методам. Описание задач,

решаемых с помощью нейронных сетей, можно найти в работе [17], а также в серии монографий [20–23].

В качестве нейронной сети в данном случае используется многослойный перцептрон с предобучением на базе метода псевдообратных матриц [23–25] и дообучением методом обратного распространения ошибки [26, 27]. Первый вариант сети рассматривает использование в качестве обучающих примеров вектора дифференциальной толщи по высотам и дифференциальной толщи, найденной по отраженному сигналу, а также значений концентрации газа на данной высоте. Первое используется в качестве входа сети, второе – в качестве выхода. Второй вариант сети добавляет к входному вектору профиль давления.

Количество слоев в сети три, активационная функция нейронов логистическая, первый слой содержит количество нейронов, равное двойному числу выходов самой сети. Так как в нашем случае высота зондирования 23 км, а шаг строба 100, то количество входных нейронов 460, нейронов промежуточного слоя 230, выходных нейронов 230. Количество входов 231, количество выходов 230. Во втором варианте обучающая выборка содержит 500 примеров, а тестовая 150.

Обучающая выборка создается на базе атмосферных моделей, упомянутых выше; тестовая выборка состоит из примеров, не включенных в обучающую выборку. Предварительно обучающая выборка обязательно нормализуется по входным и выходным примерам, по каждому отдельному выходу и входу нейронной сети:

$$E_{i,j}^l = \frac{(E_{i,j}^l - \min E_i^l)}{\max E_i^l - \min E_i^l}, \quad (12)$$

где  $E_{i,j}^l$  – ненормированное  $i$ -е входное или выходное значение для  $j$ -го примера.

Математически функционирование трехслойной нейронной сети можно описать следующим выражением:

$$n_i = \phi_{3,i} \left\{ \sum_{j_1=0}^{N_{21}-1} \omega_{i,j_1}^3 \phi_{2,j_1} \left[ \sum_{j_2=0}^{N_{22}-1} \omega_{j_1,j_2}^2 \phi_{1,j_2} \left( \sum_{j_3=0}^{N_{23}-1} \omega_{j_2,j_3}^1 x_{j_3} \right) \right] \right\}, \quad (13)$$

где  $\phi_{i,j}$  – активационная функция  $j$ -го нейрона  $i$ -го слоя;  $\omega_{i,j}^n$  –  $j$ -й весовой коэффициент  $i$ -го нейрона  $n$ -го слоя;  $n_i$  – выходные значения нейронной сети, соответствующие выходу  $i$ -го нейрона последнего слоя;  $x_{j_3}$  – входные значения нейронной сети, их количество равно числу входов каждого входного нейрона нейронной сети;  $N_{z_k}$  – количество входов у нейронов данного слоя  $k$  (для первого слоя совпадает с количеством входных значений для нейронной сети).

В данной сети предварительно обучается часть нейронов первого слоя на основе псевдообращения матриц. Затем сеть дообучается методом обратного распространения ошибки [26, 27]. В работе [28], посвященной идентификации флуоресцирующих микроорганизмов, было показано, что комбинация

двух алгоритмов дает лучшие результаты по сравнению с применением их по отдельности. Основной мотив применения метода предобучения связан с проблемой убывающего градиента от последнего к первому слою [29, 30]. Показано, что предобучение первого слоя ускоряет обучение сети, при этом если использовать просто предобученный первый слой в качестве нейронной сети, то погрешность работы такой сети выше, чем при использовании дообученной многослойной сети.

Алгоритм предобучения нейронной сети с использованием псевдообратных матриц основан на матрично-векторных преобразованиях. Если вход и выход нейронной сети представить в виде векторов, а весовые коэффициенты в виде матрицы, то связь входа однослойной нейронной сети с ее выходом можно представить в виде выражения

$$W = \Psi^{-1}(D)X^T(XX^T)^{-1}, \quad (14)$$

где  $D$  – матрица выходных значений;  $X$  – матрица входных значений;  $\Psi^{-1}$  – функция, обратная активационной функции.

Во входных  $X$  и выходных матрицах  $D$  обучающие примеры расположены в столбцах матриц; каждая строка матрицы весовых коэффициентов принадлежит одному нейрону. Способ предобучения заключается в выражении матриц коэффициентов через входную, выходную матрицы и активационные функции. Для однослойной сети данные выражения можно определить следующим образом:

$$D = \Psi(WX), \quad \Psi^{-1}(D) = WX,$$

где, например, для активационной функции  $\phi(g) = \arctg(g)$  обратная активационная функция –  $g(\phi) = tg(\phi)$ , а для  $\phi(g) = \frac{1}{1+e^{-g}}$  –  $g(\phi) = -\ln\left(\frac{1}{\phi} - 1\right)$ .

Пример сети, где в качестве части нейронов используются предобученные, приводится на рис. 4.

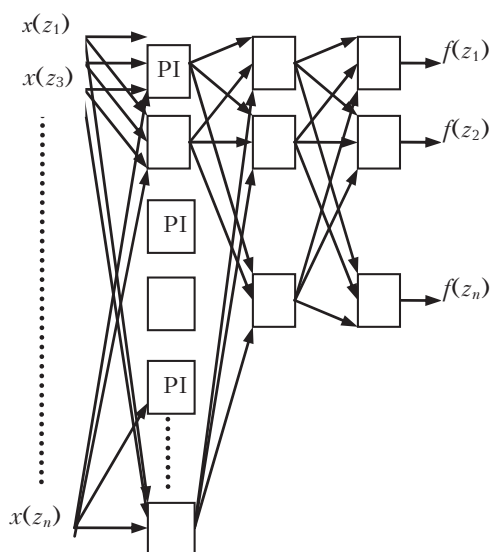


Рис. 4. Пример комбинированной сети с частью нейронов, обученных методом псевдообратных матриц

С использованием данного подхода обучается часть нейронов первого слоя. Поэтому количество нейронов первого слоя должно быть равно или больше количества выходов. Было показано [28], что оптимальное количество входных нейронов в несколько (3–5) раз больше, чем выходных. В нашем случае из-за большого числа выходов количество нейронов входного слоя взято в два раза больше, чем выходных нейронов.

Результаты работы сети на тестовой выборке приведены на рис. 5.

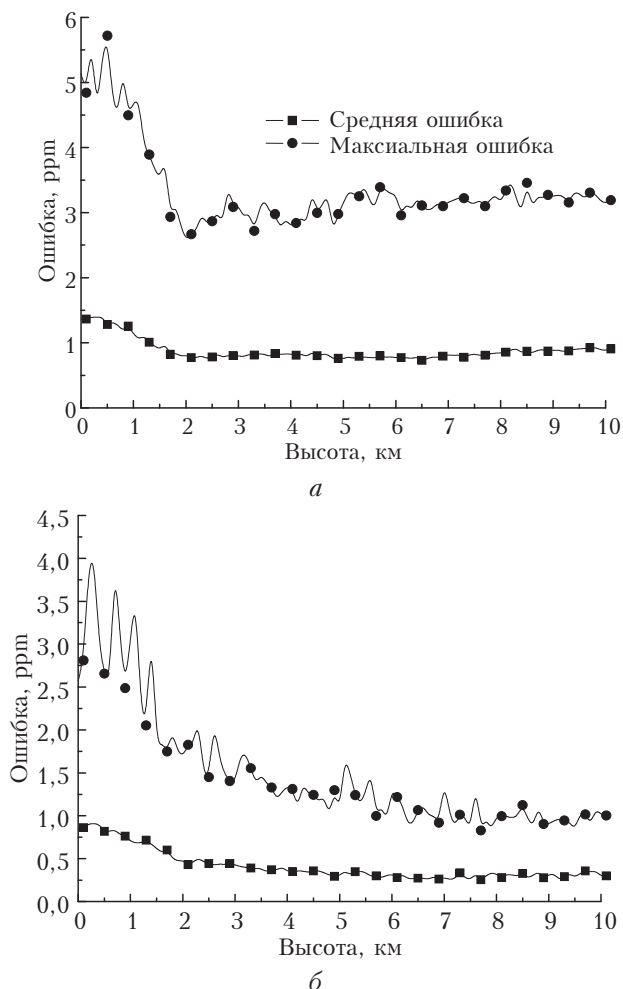


Рис. 5. Ошибки нейронной сети в случае обучения на примерах без учета (а) и с учетом профиля давления (б)

Видно, что нейронная сеть на приземных высотах дает лучшие результаты, чем все предложенные выше алгоритмы, при достаточно высокой скорости работы самого алгоритма восстановления. Процесс обучения – это, естественно, вычислительно более сложная процедура.

### Заключение

В ходе данного исследования выбраны схема и параметры лидара, при которых достижима средняя ошибка восстановления относительной концентрации  $CO_2$  меньше 1 ppm при использовании

нейронной сети и генетического алгоритма и совмещении сигналов DIAL и IPDA. Для других рассмотренных алгоритмов ошибка на приземных высотах выше на 0,5–1 ppm. На некоторых высотах точность восстановления может быть очень низкой из-за шумов в сигналах и применяемой процедуры сглаживания; часто выделяется какой-то узкий диапазон высот, где алгоритмы восстановления имеют приемлемую точность, а где-то очень низкую. Нейронная сеть позволяет получить стабильно хороший результат практически на всех высотах, что показывает эффективность бионических методов и в решении обратных задач лидарного зондирования. Применение генетического алгоритма обеспечивает и более точные результаты, нежели стандартные алгоритмы, но требует информацию об ошибке оптической толщи по высотам. Все это не указывает на преимущества использования в дальнейшем именно генетического алгоритма в решении рассматриваемой задачи, так как, по сути, это задача оптимизации, для которой разработано и множество других методов. Реальная выгода применения генетического алгоритма состоит в простоте реализации и в большей вероятности определения глобального оптимума задачи, а также в простоте модификации под нужды конкретной целевой функции.

Данная работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ НШ-8199.2016.5.

1. Dufour E. and Bréon F.-M. Spaceborne Estimate of Atmospheric CO<sub>2</sub> Column by Use of the Differential Absorption Method: Error Analysis // *Appl. Opt.* 2003. V. 42, N 18. P. 3595–3609.
2. Ehret G., Kiemle C., Wirth M., Amediek A. Spaceborne remote sensing of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O by integrated path absorption lidar: A sensitivity analysis // *Appl. Phys. B.* 2008. V. 90. P. 593–608.
3. Бабченко С.В., Матвиенко Г.Г., Суханов А.Я. Оценка возможностей зондирования парниковых газов CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> над подстилающей поверхностью IPDA лидаром космического базирования // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 1. С. 37–45; Babchenko S.V., Matvienko G.G., Sukhanov A.Ya. Assessing the possibilities of sensing CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> greenhouse gases above the underlying surface with satellite-based IDPA lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 245–253.
4. Miller S.H., Fesen R., Hillenbrand L., Rhodes J., Baird G., Blake G., Booth J., Carlile D.E., Duren R., Edworthy F.G., Freeze B., Friedl R.R., Goldsmith P.F., Hall J.L., Hoffman S.E., Hovarter S.E., Jensen-Clem R.M., Jones R.M., Kauffmann J., Kiessling A., King O.G., Konidaris N., Lachenmeier T.L., Lord S.D., Neu J., Quetin G.R., Ram A., Sander S., Simard M., Smith M., Smith S., Smoot S., Susca S., Swann A., Young E.F., Zambrano T. Airships: A new horizon for science. Keck Institute for Space Studies, California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory. 2014. 56 p.
5. Прус Ю.В., Бутуев Б.Ж., Шаповалов В.М. Некоторые аспекты использования стратосферных дирижаблей в интересах обеспечения безопасности территории // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» Вып. 1 (29). 2010. 10 с. (<http://ipb.mos.ru/ttb>)
6. Проблемные вопросы создания высотных аэростатических платформ как перспективного средства телерадиокоммуникационного и мониторингового обеспечения / Под ред. С.Л. Чернышева // Тр. ЦАГИ. 2009. Вып. 2682. 58 с.
7. Menzies R.T., Pratt D.M. Differential laser absorption spectrometry for global profiling of tropospheric carbon dioxide: Selection of optimum sounding frequencies for high precision measurements // *Appl. Opt.* 2003. V. 42, iss. 33. P. 6569–6577.
8. Spiers G.D., Menzies R.T., Phillips M., Geier S., Poberzhskiy I., Meras P. Recent results and progress on the development of a Laser Absorption Spectrometer for CO<sub>2</sub> sink and source detection // *Proc. 14th Coherent Laser Radar Conf. Snowmass, Colorado, 2007.* P. 118–121.
9. Dobbs M.E., Dobler J., Braun M., McGreor D., Overbeck J., Moore III B., Browell E.V., Zaccheo T.S. A Modulated CW Fiber Laser-Lidar Suite for the ASCENDS Mission // *Proc. 24th Int. Laser Radar Conf. Boulder, 2008.* P. 24–29.
10. Dobbs M.E., Sharp W., Browell E.V., Zaccheo T.S., Moore III B. A Sinusoidal Modulated CW Integrated Path Differential Absorption Lidar for Mapping Sources and Sinks of Carbon Dioxide from Space // *Proc. 14th Coherent Laser Radar Conf. Snowmass, Colorado, 2007.* P. 124–127.
11. Dobler J.T., Harrison F.W., Browell E.V., Lin B., McGreor D., Kooi S., Choi Y., Ismail S. Atmospheric CO<sub>2</sub> column measurements with an airborne intensity-modulated continuous wave 1.57 μm fiber laser lidar // *Appl. Opt.* 2013. V. 52, N 12. P. 2874–2892. DOI: 10.1364/AO.52.002874.
12. Dobler J., Dobbs M., Erxleben W., McGreor D., Moore III B., Harrison W., Zaccheo T.S., Hager S. Pressure Retrieval using CW Laser Absorption Spectroscopy of an O<sub>2</sub> Line near 1271 nm with a Spectrally Broad Laser Source // *Proc. 24th International Laser Radar Conf. Boulder, 2008.* P. 49–52.
13. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофонов А.В., Бабченко С.В., Иноуе Г., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
14. Labitzke K., Barnett J.J., Edwards B. (eds.). Handbook MAP 16. SCOSTEP. 1985. 320 p.
15. Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, iss. A2. P. 1159–1172.
16. Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 264 с.
17. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я. Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности. 3. Решение обратной задачи // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 9. С. 862–872.
18. Креков Г.М., Суханов А.Я. Улучшенный генетический алгоритм многоволнового лидарного зондирования атмосферного аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 754–758; Krekov G.M., Sukhanov A.Ya. Improved genetic algorithm for multiwave lidar sensing of atmospheric aerosol // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 2. P. 130–134.
19. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975. 183 p.
20. Банах В.А., Белов В.В., Землянов А.А., Креков Г.М., Лукин В.П., Матвиенко Г.Г., Носов В.В., Суханов А.Я.,



- Фалиц А.В.* Распространение оптических волн в неоднородных, случайных, нелинейных средах. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 402 с.
21. *Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Сериков И.Б., Суханов А.Я.* Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. 510 с.
  22. *Алексимов Д.В., Багаев С.Н., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Кирпичников А.В., Кистенев Ю.В., Креков Г.М., Крекова М.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Панина Е.К., Петров В.В., Пестряков Е.В., Пономарев Ю.Н., Суханов А.Я., Тихомиров Б.А., Трунов В.И., Уогинтас С.Р., Фролов С.А., Худорожков Д.Г.* Фемтосекундная атмосферная оптика / Под общ. ред. С.Н. Багаева, Г.Г. Матвиенко. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 240 с.
  23. *Балин Ю.С., Боровой А.Г., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Клемашева М.Г., Коношонкин А.В., Коханенко Г.П., Кустова Н.В., Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Пеннер И.Э., Романовский О.А., Самойлова С.В., Суханов А.Я., Харченко О.В., Шишко В.А.* Лидарный мониторинг облачных и аэрозольных полей, малых газовых составляющих и метеопараметров атмосферы / Под ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. 450 с.
  24. *Суханов А.Я., Креков Г.М.* Распознавание спектров флуоресценции бактерий и полиароматических углеводородов // ММРО-15. г. Петрозаводск, Республика Карелия, 11–17 сентября 2011. 4 с.
  25. *Суханов А.Я.* Алгоритмы, методы и комплексы программ для решения задач лидарного зондирования атмосферы: Дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2006. 151 с.
  26. *Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.* Learning representations by back-propagating errors // *Nature*. (Gr. Brit.). 1986. V. 323. P. 533–536.
  27. *Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.* Learning internal representations by error propagation / D.E. Rumelhart, J.L. McClelland, (eds.) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. V. 1. Foundations* MIT Press, Cambridge, MA, 1986. P. 318–362.
  28. *Суханов А.Я., Петров И.В.* Сравнение алгоритмов обучения нейронной сети для решения задачи идентификации биоаэрозолей // *Аэрозоли Сибири. XXIII Рабочая группа: 29 ноября – 2 декабря 2016 г.* Томск: Изд-во ИОА СО РАН. Тез. докл. С. 84. [http://symp.iao.ru/files/symp/sa/23/ru/abstr\\_8506.pdf](http://symp.iao.ru/files/symp/sa/23/ru/abstr_8506.pdf)
  29. *Glorot X., Bengio Y.* Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks // *Proc. Mach. Learn. Res.* 2010. V. 9. P. 249–256.
  30. *Pascanu R., Mikolov T., Bengio Y.* On the difficulty of training Recurrent Neural Networks // *arXiv preprint arXiv:1211.5063* [<http://arxiv.org/abs/1211.5063v2>]. 2012. 11 p.

***A.Ya. Sukhanov. Airborne DIAL-IPDA lidar sensing of carbom dioxide inverse problem solution on basis bionic methods.***

Application of bionic methods, such as neural networks and genetic algorithms, to solution of the inverse problem of CO<sub>2</sub> relative concentration determination from stratospheric airship signals is considered. The back-scattered and reflected from the surface signals at wavelengths near 1572 nm are used for the measurements. The errors of the standard DIAL approach and DIAL-IDPA technology are compared. For the lidar with specification described, the mean error of algorithms developed is lower than 1 ppm. The genetic algorithm used is based on the minimization of the difference between the model signal and the signal received. Application of neural networks is based on their training on the examples of the simulated signals (reflected and scattered) and the altitude distribution of the gas concentration.