МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ФОТОГРАММЕТРИЯ, МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ГЕОЭКОЛОГИЯ

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2015

УДК 502:528.7
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск
А. П. Гук

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск
В. И. Кузин

Кандидат технических наук, директор ООО «СИБ-ГЕО-МАР», доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск
А. В. Комиссаров

Кандидат технических наук, доцент,
руководитель отдела аспирантуры СГУГиТ, Новосибирск
Т. А. Широкова

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования СГУГиТ, Новосибирск
А. С. Гордиенко

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 260 с.

ISBN 978-5-87693-802-2 (т. 1)
ISBN 978-5-87693-801-5
ISBN 978-5-87693-795-7

В сборнике опубликованы материалы XI Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015», представленные на Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ
Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 502:528.7

ISBN 978-5-87693-802-2 (т. 1)
ISBN 978-5-87693-801-5
ISBN 978-5-87693-795-7
© СГУГиТ, 2015

Сборник включен в систему РИНЦ.

УДК 528.711.11

О ВОЗМОЖНОСТИ КАЛИБРОВКИ КАМЕР БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КООРДИНАТ ОПОРНЫХ ТОЧЕК

Андрей Владимирович Семенцов
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий научно-производственной лабораторией «ТЕМПУС» в Центре геоинформационных компетенций, тел. (960)779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

Вячеслав Николаевич Никитин
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

В статье приводится доказательство возможности использования условия равенства координат точек трансформированных снимков для калибровки камер. Приведённая информация является дополнением к опубликованной ранее статье.

Ключевые слова: калибровка камер, условие равенства координат, внутреннее ориентирование снимков, дисторсия объектива, функциональные связи.

ABOUT THE ABILITY OF CAMERA CALIBRATION WITHOUT USING CONTROL POINTS COORDINATES

Andrey V. Sementsov
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., head of scientific and production laboratory «TEMPUS» of the center of geoinformation competencies, tel. (960)779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

Vyacheslav N. Nikitin
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Assoc. Prof. of department of physical geodesy and remote sensing SSUGT, tel. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

The article gives a proof of the possibility of using the condition of equality of the points coordinates of the transformed images to calibrate the cameras. The given information is an addition to the previously published article.

Key words: camera calibration, condition of equal coordinates, interior orientation of images, lens distortion, functional links.

Данная статья является дополнением к статье «Калибровка без использования твёрдых опорных данных», опубликованной в журнале «Геодезия и картография» №4 в 2014 г [3]. В указанной публикации были рассмотрены аналитические зависимости, возникающие в процессе решения систем уравнений, лежащих в основе методики калибровки камер, предполагающей использование функциональных связей между координатами соответственных точек, отобра-

зившихся на разных снимках [2]. Следует отметить, что в данной статье анализ выполнялся с учётом дисторсии только 0 и 1 порядков.

Напомним, что важным условием рассмотренного подхода является получение нескольких снимков из одного центра фотографирования при разных наклонах оптических осей фотоаппарата.

С учётом поступивших замечаний по указанной статье [1] целесообразно рассмотреть возможности калибровки камер указанным способом в более общем виде.

Сразу стоит оговориться, что всё-таки применительно к предложенной методике более корректным является использование формулировки «калибровка без использования координат опорных точек».

Итак, вернёмся ещё раз к доказательству возможности использования условия равенства координат точек трансформированных снимков для калибровки.

Для этого рассмотрим условие равенства координат точек двух снимков, записанное в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \end{pmatrix} = N \times A \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f \end{pmatrix}. \qquad (1)$$

Очевидно, что данное равенство выполняется, если измеренные координаты точек, фокусное расстояние и параметры разворота не содержат ошибок.

Если перечисленные параметры определены с погрешностями, то равенство будет выполняться с учётом возникающих невязок:

$$\begin{pmatrix} x_1 + \sigma_{1x} + \xi_{1x} \\ y_1 + \sigma_{1y} + \xi_{1y} \\ -f - df \end{pmatrix} = dN \times dA \times N \times A \begin{pmatrix} x_2 + \sigma_{2x} + \xi_{2x} \\ y_2 + \sigma_{2y} + \xi_{2y} \\ -f - df \end{pmatrix} + V \qquad (2)$$

или

$$V = \begin{pmatrix} x_1 + \sigma_{1x} + \xi_{1x} \\ y_1 + \sigma_{1y} + \xi_{1y} \\ -f - df \end{pmatrix} - dN \times dA \times N \times A \begin{pmatrix} x_2 + \sigma_{2x} + \xi_{2x} \\ y_2 + \sigma_{2y} + \xi_{2y} \\ -f - df \end{pmatrix}. \qquad (3)$$

Здесь σ – дисторсия;

df – погрешность определения фокусного расстояния;

ξ – случайные погрешности измерений.

Если использовать равенство (1), то, раскрывая скобки, получим:

$$V=\begin{pmatrix}x_1\\y_1\\-f\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\sigma_{1x}+\xi_{1x}\\\sigma_{1y}+\xi_{1y}\\-df\end{pmatrix}-dN\times dA\left(N\times A\begin{pmatrix}x_2\\y_2\\-f\end{pmatrix}\right)-dN\times dA\times N\times A\begin{pmatrix}\sigma_{2x}+\xi_{2x}\\\sigma_{2y}+\xi_{2y}\\-df\end{pmatrix}\Rightarrow$$

$$V=\begin{pmatrix}x_1\\y_1\\-f\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\sigma_{1x}+\xi_{1x}\\\sigma_{1y}+\xi_{1y}\\-df\end{pmatrix}-dN\times dA\begin{pmatrix}x_1\\y_1\\-f\end{pmatrix}-dN\times dA\times N\times A\begin{pmatrix}\sigma_{2x}+\xi_{2x}\\\sigma_{2y}+\xi_{2y}\\-df\end{pmatrix}\Rightarrow$$

$$V=\left(I-dN\times dA\right)\begin{pmatrix}x_1\\y_1\\-f\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\sigma_{1x}+\xi_{1x}\\\sigma_{1y}+\xi_{1y}\\-df\end{pmatrix}-dN\times dA\times N\times A\begin{pmatrix}\sigma_{2x}+\xi_{2x}\\\sigma_{2y}+\xi_{2y}\\-df\end{pmatrix}\Rightarrow$$

$$V=\left(I-dN\times dA\right)\begin{pmatrix}x_1\\y_1\\-f\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\sigma_{1x}\\\sigma_{1y}\\-df\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\xi_{1x}\\\xi_{1y}\\0\end{pmatrix}-dN\times N\times dA\times A\begin{pmatrix}\sigma_{2x}\\\sigma_{2y}\\-df\end{pmatrix}-dN\times N\times dA\times A\begin{pmatrix}\xi_{2x}\\\xi_{2y}\\0\end{pmatrix}\Rightarrow$$

$$V=\left(I-dN\times dA\right)\begin{pmatrix}x_1\\y_1\\-f\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\sigma_{1x}\\\sigma_{1y}\\-df\end{pmatrix}-dN\times N\times dA\times A\begin{pmatrix}\sigma_{2x}\\\sigma_{2y}\\-df\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\xi_{1x}\\\xi_{1y}\\0\end{pmatrix}-dN\times N\times dA\times A\begin{pmatrix}\xi_{2x}\\\xi_{2y}\\0\end{pmatrix}\quad(4)$$

Если в равенство добавить адекватное математическое описание дисторсии, то очевидно, что сумма квадратов невязок в системе уравнений составит

$$\min\sum v^2=\sum\left(\xi_1-N\xi_2\right)^2=\sum N^2\xi_1^2+\sum\xi_2^2-\sum 2N\xi_1\xi_2=\sum\xi_1^2+\sum N^2\xi_2^2\ .\quad(5)$$

Однако аналогичный результат решения систем уравнений может быть получен и при существовании зависимости между дисторсиями точек, изображённых на первом и втором снимках, полученных из выражения (4):

$$\begin{pmatrix}\sigma_{1x}\\\sigma_{1y}\\-df\end{pmatrix}=dN\times N\times dA\times A\begin{pmatrix}\sigma_{2x}\\\sigma_{2y}\\-df\end{pmatrix}-\left(I-dN\times dA\right)\begin{pmatrix}x_1\\y_1\\-f\end{pmatrix}.\quad(6)$$

Таким образом, по одной паре снимков определить параметры несимметричной в пределах снимка дисторсии невозможно. Неопределённости можно избежать, используя, например, центросимметричную радиальную модель дисторсии, или увеличив количество функциональных зависимостей между дисторсиями точек путём увеличения количества снимков с разными углами разворота.

В программе, разработанной авторами, для калибровки камер без использования координат опорных точек применяется условие равенства координат точек трансформированных снимков:

$$\begin{aligned} x'_{ni} - (-f)\frac{X_{nji}}{Z_{nji}} &= v_x \\ y'_{ni} - (-f)\frac{Y_{nji}}{Z_{nji}} &= v_y \end{aligned}, \qquad (7)$$

$$\begin{pmatrix} X_{nji} \\ Y_{nji} \\ Z_{nji} \end{pmatrix} = A^{-1}_{\alpha\omega\kappa_i} \cdot A_{\alpha\omega\kappa_j} \begin{pmatrix} x'_{nj} \\ y'_{nj} \\ -f \end{pmatrix} . \qquad (8)$$

где x'_{ni}, y'_{ni} – исправленные за дисторсию координаты n-ой точки на снимке i;

$A_{\alpha\omega\kappa_i}$ – матрица перехода из пространственной системы координат снимка i во внешнюю систему координат через углы Эйлера.

Уравнения составляются для всех пар соответственных точек на снимках i и j. Дополнительное ограничение – $\alpha_1 = 0$, $\omega_1 = 0$, $\kappa_1 = 0$.

Таким образом, проведённый анализ дополнительно подтверждает возможность использования данной методики для калибровки цифровых камер [4,5,6]. Усовершенствованная методика, позволяющая исключать погрешности, вносимые нестрогим соблюдением геометрических условий [8], а также использовать дополнительное геометрическое условие [7] на взаимное расположение точек тест-объекта [9, 10], будет представлена в следующей публикации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубиновский В. Б. Калибровка снимков. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

2. Антипов И. Т. Калибровка камер без использования твердых опорных данных // Геодезия и картография. – 2014. – № 7. – С. 59–60.

3. Семенцов А. В. Калибровка камер без использования твердых опорных данных // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 26–30.

4. Калибровка снимков на равнинном испытательном полигоне с определением координат центров фотографирования / Макаров А. П., Быков Л. В., Быков В. Л., Быков А. Л. // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4. – С. 60–62.

5. Никитин В. Н. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2014. – № 2. – С. 71–80.

6. Никитин В. Н., Николаева Т. В. Калибровка цифровой неметрической камеры по снимкам звёздного неба // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск 15-26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 7–11.

7. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезических и фотограмметрических задач // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 41–45.

8. Семенцов А. В., Никитин В. Н. Влияние нестрогого соблюдения геометрических условий на точность определения элементов внутреннего ориентирования при калибровке камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. научн. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов (Новосибирск 8–18 апр. 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 1. – С. 72–80.

9. Семенцов А. В. Разработка тест-объекта для калибровки цифровых камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012 : VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : сб. молодых учёных СГГА. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 60–65.

10. Черемушкин А. В. Тест-объект для калибровки фотографических систем // ГЕО-Сибирь-2006. II Международный научный конгресс: сб. материалов. (Новосибирск, 19–29 апреля 2006 г.). – Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 116–118.

© А. В. Семенцов, В. Н. Никитин, 2015

УДК 528.711.11

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШТАТИВА В МЕТОДИКЕ КАЛИБРОВКИ КАМЕР БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КООРДИНАТ ОПОРНЫХ ТОЧЕК

Андрей Владимирович Семенцов
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий научно-производственной лабораторией «ТЕМПУС» в Центре геоинформационных компетенций, тел. (960)779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

Вячеслав Николаевич Никитин
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

В статье описывается методика калибровки камер, в основе которой лежит использование условия равенства координат точек трансформированных снимков. Приведённая информация является продолжением к опубликованной ранее статье. Однако в данной методике уже учитываются погрешности, вносимые нестрогим соблюдением геометрических условий, а также используется дополнительное геометрическое условие на взаимное расположение точек тест-объекта.

Ключевые слова: калибровка камер, условие равенства координат, внутреннее ориентирование снимков, дисторсия объектива, функциональные связи.

IMPLEMENTATION OF MATHEMATICAL MODEL OF TRIPOD IN METHOD OF CAMERA CALIBRATION WITHOUT USING CONTROL POINTS COORDINATES

Andrey V. Sementsov
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., head of scientific and production laboratory «TEMPUS» of the center of geoinformation competencies, tel. (960)779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

Vyacheslav N. Nikitin
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Assoc. Prof. of department of physical geodesy and remote sensing, tel. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

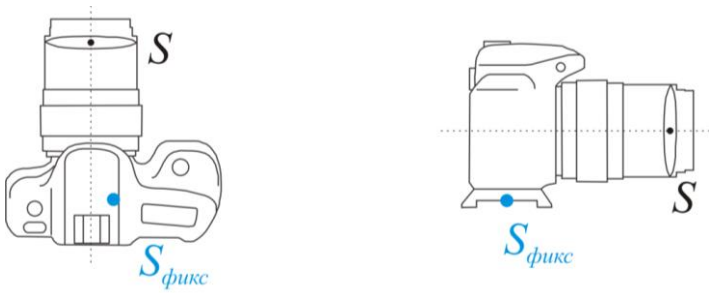
This article describes method of camera calibration, based on the condition of equality of the points coordinates of the transformed images. The above information is an extension to the previously published article. However, in this method the errors due to the nonrigorous observance of geometric conditions are already taken into account, and also additional geometric condition for the mutual arrangement of the points of the test object is used.

Key words: camera calibration, condition of equal coordinates interior orientation of images, lens distortion, functional links.

В ходе исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, была обоснована методика калибровки камер без использования координат опор-

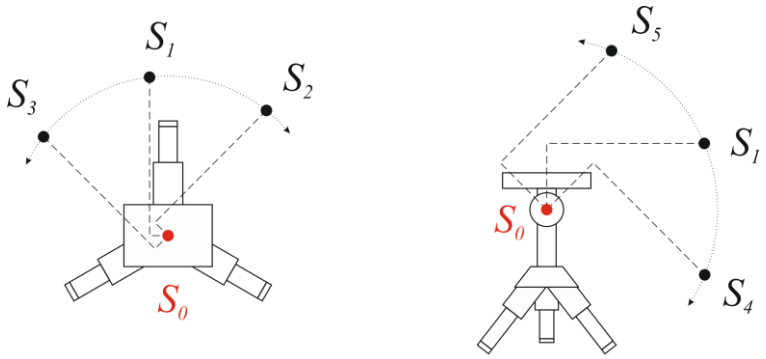
ных точек [7]. Суть методики состоит в определении калибровочных параметров под условием равенства координат точек трансформированных снимков. При этом снимки должны быть получены из одного центра фотографирования при разном положении главной оптической оси.

Однако данная методика мало применима на практике, так как возникает проблема с обеспечением главного условия – использование общего центра фотографирования [8]. Это обусловлено конструкцией фотографических штативов. В таких штативах центр фотографирования камеры не соответствует центру вращения штативной головки. Это показано на рис. 1 и рис. 2.



а) б)

Рис. 1. Несовпадение центра фотографирования и точки крепления камеры на штативе: а) вид сверху; б) вид сбоку



а) б)

Рис. 2. Смещение центра фотографирования относительно точки поворота камеры на штативе:
а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости

Очевидно, что центры фотографирования при повороте камеры будут расположены на поверхности сферы (рис. 3).

В общем виде математическую модель штатива можно записать следующей формулой

$$S_i = S_0 + A_i \cdot l, \qquad (1)$$

где S_i – координаты i-го центра фотографирования; S_0 – координаты точки вращения штативной головки; A_i – матрица перехода из пространственной системы координат снимка во внешнюю систему координат; l – вектор смещений

точки фотографирования относительно точки вращения штативной головки в пространственной системе координат снимка.

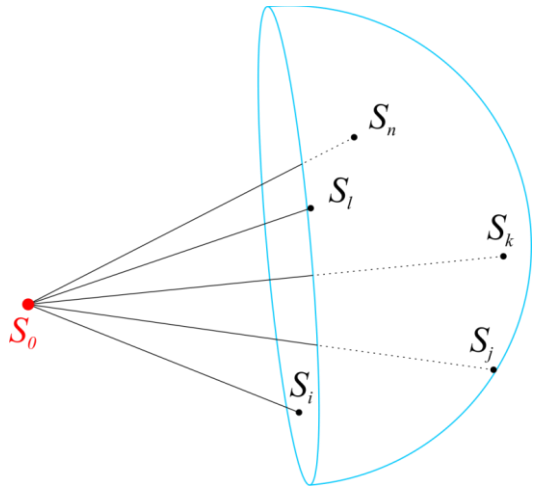


Рис. 3. Положение центров фотографирования относительно точки вращения штативной головки

Поэтому была разработана методика калибровки камер без использования координат опорных точек с применением математической модели штатива.

Для калибровки цифровых камер по разработанной методике (рис. 4) необходимо выполнять следующие условия:

– применять математическую модель штатива, согласно формуле (1) в качестве дополнительного геометрического условия [5];

– использовать не менее четырёх снимков для определения параметров сферы, по которой перемещается центр фотографирования;

– использовать условие коллинеарности вместо условия равенства координат точек трансформированных снимков;

– задать дополнительное условие на размещение точек тест-объекта, например условие плоскости $aX + bY + cZ + d = 0$.

При калибровке без координат опорных точек с использованием математической модели штатива уравнивание выполняется в три этапа:

1) С использованием условия равенства координат трансформированных снимков;

2) Совместное использование условия равенства координат и условия коллинеарности;

3) С использованием только условия коллинеарности.

Условие равенства координат точек трансформированных снимков для этапов 1 и 2 записывается в виде:

$$x'_{ni} - (-f)\frac{X_{nji}}{Z_{nji}} = v_x \qquad y'_{ni} - (-f)\frac{Y_{nji}}{Z_{nji}} = v_y \qquad \begin{pmatrix} X_{nji} \\ Y_{nji} \\ Z_{nji} \end{pmatrix} = A^{-1}_{\alpha\omega\kappa_i} \cdot A_{\alpha\omega\kappa_j} \begin{pmatrix} x'_{nj} \\ y'_{nj} \\ -f \end{pmatrix}, \qquad (2)$$

где x'_{ni}, y'_{ni}, x'_{nj}, y'_{nj} – исправленные за дисторсию координаты n-ой точки на снимках i и j;

$A_{\alpha\omega\kappa_i}$, $A_{\alpha\omega\kappa_j}$ – матрица перехода из пространственной системы координат снимков i и j во внешнюю систему координат через углы Эйлера.

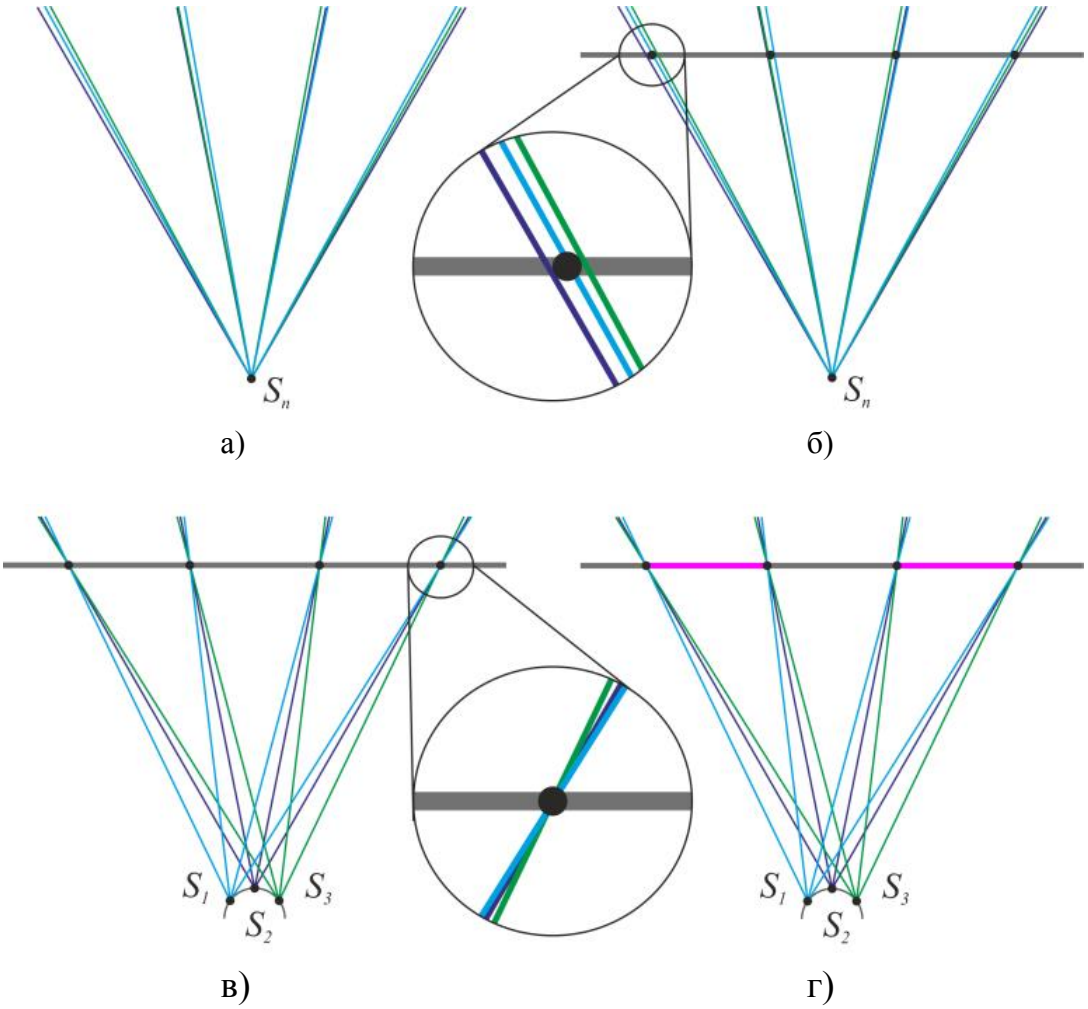


Рис. 4. Процесс определения параметров калибровки с использованием математической модели штатива:
а) решение системы уравнений под условием равенства координат точек трансформированных снимков; б) вычисление приближённых координат точек тест-объекта исходя из условия размещения точек тест-объекта; в) решение системы уравнений под условием коллинеарности с использованием математической модели штативной головки; г) использование дополнительных геометрических условий на взаимное расположение точек тест-объекта

Уравнения составляются для всех пар соответственных точек на снимках i и j. Дополнительное ограничение – $\alpha_1 = 0,\ \omega_1 = 0,\ \kappa_1 = 0$.

Условие коллинеарности для этапов 2 и 3 записывается в виде:

$$\begin{aligned} x'_{ni} - (-f)\frac{X'_{ni}}{Z'_{ni}} &= v_x \\ y'_{ni} - (-f)\frac{Y'_{ni}}{Z'_{ni}} &= v_y \end{aligned} \qquad \begin{pmatrix} X'_{ni} \\ Y'_{ni} \\ Z'_{ni} \end{pmatrix} = A^{-1}_{\alpha\omega\kappa_i} \begin{pmatrix} X_{\Gamma n} - X_{Si} \\ Y_{\Gamma n} - Y_{Si} \\ Z_{\Gamma n} - Z_{Si} \end{pmatrix}. \qquad (3)$$

Координаты $X_{Гп}, Y_{Гп}$ точек тест-объекта определяются в результате уравнивания, координата $Z_{Гп}$ вычисляется по параметрам A, B, C, D уравнения плоскости тест-объекта:

$$Z_{Гп} = -\frac{AX_{Г} + BY_{Г} + D}{C}, \tag{4}$$

Математическая модель штатива определяется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} X_{Si} \\ Y_{Si} \\ Z_{Si} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S_0} \\ Y_{S_0} \\ Z_{S_0} \end{pmatrix} + A_{\alpha\omega\kappa_i} \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix}, \tag{5}$$

где $X_{S_0}, Y_{S_0}, Z_{S_0}$ – координаты точки вращения штативной головки во внешней системе координат; в данном случае принимаются равными нулю ($X_{S_0} = Y_{S_0} = Z_{S_0} = 0$);

l_x, l_y, l_z – плечо штатива: вектор от центра вращения штативной головки до передней узловой точки объектива при ориентации камеры по начальному направлению (в данном случае – первый снимок из серии, согласно условию $\alpha_1 = 0,\ \omega_1 = 0,\ \kappa_1 = 0$).

Параметры уравнения плоскости тест-объекта вычисляются по расстоянию до тест-объекта от центра вращения штативной головки dZ и ориентации нормали плоскости α_{TO}, ω_{TO}:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = A_{\alpha_{TO}\omega_{TO}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ dZ \end{pmatrix} \qquad D = \left(\begin{pmatrix} X_{S_0} \\ Y_{S_0} \\ Z_{S_0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix}. \tag{6}$$

В сериях наших экспериментов $dZ = -2$ м.

Порядок уравнивания выглядит следующим образом:

1) Этап 1. Условие равенства координат трансформированных координат:

– итерационно определяем угловые элементы ориентирования снимков с учётом $\alpha_1 = 0,\ \omega_1 = 0,\ \kappa_1 = 0$;

– добавляем к итерационно определяемым параметрам элементы внутреннего ориентирования;

– добавляем к итерационно определяемым параметрам коэффициенты математической модели дисторсии.

2) Этап 2. Совместное использование условий равенства координат и коллинеарности:

– разово вычисляем параметры плоскости тест-объекта с учётом $X_{S_0} = Y_{S_0} = Z_{S_0} = 0,\ dZ = -2,\ \alpha_{TO} = \omega_{TO} = 0$;

– разово вычисляем приближённые значения координат точек тест-объекта с использованием координат точек, измеренных на первом снимке и уравнения плоскости тест-объекта;

– добавляем к числу определяемых элементов координаты точек тест-объекта $X_{\Gamma n}, Y_{\Gamma n}$ и итерационно их определяем;

3) Этап 3. Использование только условия коллинеарности:

– итерационно уточняем параметры, определяемые ранее;

– добавляем к определяемым параметрам плечо штатива l_x, l_y, l_z;

– добавляем к числу определяемых параметров ориентацию нормали плоскости тест объекта α_{TO}, ω_{TO}.

В результате выполненного уравнивания измеренных координат точек тест-объекта на снимках получаем параметры дисторсии и элементы внутреннего ориентирования.

При калибровке без координат опорных точек с использованием математической модели штатива и шаблонов уравнивание выполняется аналогично предыдущему варианту, но для каждой точки тест-объекта появляется два новых атрибута: номер шаблона $N_ш$ и номер точки в шаблоне $ш_i$. Пространственные координаты точек в каждом из шаблонов связаны преобразованиями разворота и переноса с координатами точек в системе координат шаблона. Таким образом, с учётом того, что тест-объект представляет из себя плоскость, получим:

$$\begin{pmatrix} X_{\Gamma n} \\ Y_{\Gamma n} \\ Z_{\Gamma n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S_0} \\ Y_{S_0} \\ Z_{S_0} \end{pmatrix} + A_{\alpha_{TO}\omega_{TO}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ dZ \end{pmatrix} + A_{\alpha_{TO}\omega_{TO}} \left(\begin{pmatrix} x_{0_{N_ш}} \\ y_{0_{N_ш}} \\ 0 \end{pmatrix} + A_{\kappa_{N_ш}} \begin{pmatrix} x_{ш_i} \\ y_{ш_i} \\ 0 \end{pmatrix} \right). \qquad (7)$$

Теперь вместо добавления к числу определяемых параметров координат точек тест-объекта $X_{\Gamma n}, Y_{\Gamma n}$ добавляются угол разворота шаблона $\kappa_{N_ш}$ и параметры его сдвига $x_{0_{N_ш}}$ и $y_{0_{N_ш}}$. Координаты точек в системе координат шаблона задаются исходя из их взаимного расположения.

Проверка такого подхода выполнялась с применением макетных снимков [4,6,7]. Для проведения экспериментов с получением реальных снимков использовался специальный калибровочный тест-объект состоящий из шаблонов (рис. 5).

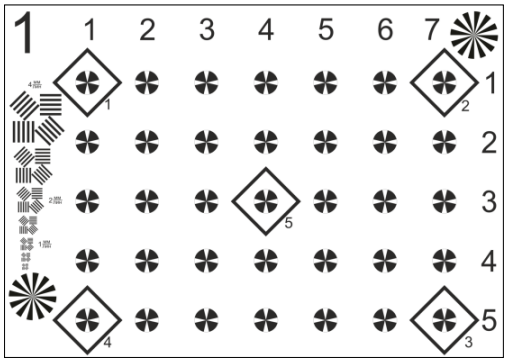


Рис. 5. Шаблон тест-объекта

Особенности и достоинства такого тест-объекта также были описаны ранее [9]. Отметим лишь, что для данной методики калибровки используется тест-объект, состоящий из 28 подобных шаблонов

Съёмка выполнялась из одного центра фотографирования с получением девяти снимков с наклоном оптической оси, согласно схеме, представленной на рис. 6.

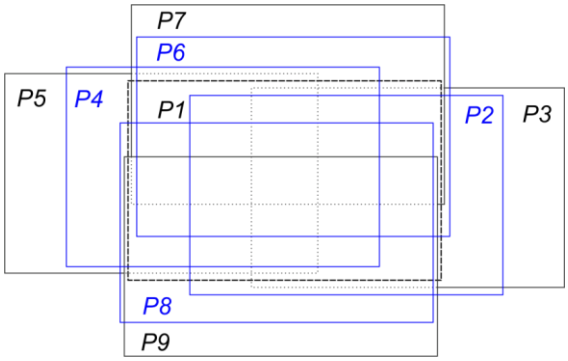


Рис. 6. Схема взаимного расположения девяти снимков при съёмке из одной точки пространства

Количество получаемых снимков намеренно увеличено относительно теоретически достаточного количества. Это сделано для исключения неопределённостей, которые могут возникать в процессе решения задачи калибровки.

Измерение соответственных точек и обработка полученных данных (рис. 7) выполнялось в программных продуктах, разработанных авторами.

Корректность предложенной методики была подтверждена на практике. В ходе экспериментов по параметрам калибровки восстанавливалась связка лучей, сопоставимая со связками, восстановленными по параметрам калибровки, полученным традиционными способами калибровки – по пространственному тест-объекту с координатами точек, координаты которых с высокой точностью определены геодезическим путём [1,2,10] и по снимку звёздного неба [3].

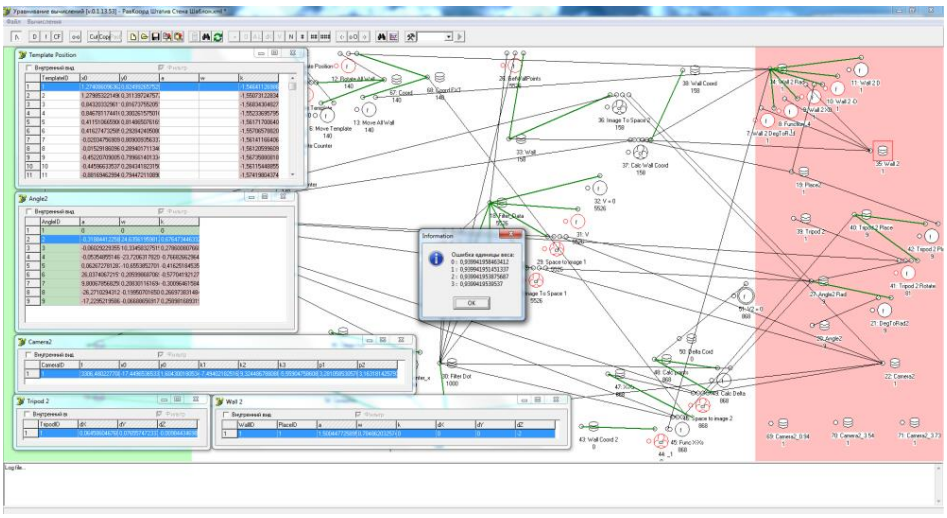


Рис. 7. Обработка данных в вычислительной среде Equilibrium

Подводя итог проведённых работ, отметим, что на основе математического анализа функциональных связей, результатов макетирования и практических экспериментов, подтверждена возможность выполнения калибровки камер без использования координат опорных точек. Так же определены оптимальные схемы фотографирования при выполнении калибровки согласно данной методики.

Предложенный подход расширяет возможности обеспечения калибровочного процесса в полевых условиях проведения работ, при отсутствии подготовленного тест-объекта.

Методика является более простой и доступной для пользователя, в отличие от методик, предполагающих измерение координат опорных точек [1,2], что подразумевает использование дорогостоящего оборудования. В то же время методика позволяет более точно учитывать условия реальной производственной съёмки, благодаря возможности увеличивать размеры тест-объекта на основе шаблонов и, следовательно, расстояние съёмки.

Кроме того, данная методика калибровки может комбинироваться с другими методиками, использующими плоский или пространственный тест-объект с известными координатами опорных точек, что приведёт к повышению точности определения калибровочных параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование методики калибровки снимков на испытательном полигоне Западно-сибирского филиала «Госземкадастрсъемка» ВИСХАГИ / Быков А. Л., Быков В. Л., Быков Л. В., Макаров А. П. // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 32-34.

2. Калибровка снимков на равнинном испытательном полигоне с определением координат центров фотографирования / Макаров А. П., Быков Л. В., Быков В. Л., Быков А. Л. // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 60–62.

3. Никитин В. Н., Николаева Т. В. Калибровка цифровой неметрической камеры по снимкам звёздного неба // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мони-

торинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 7–11.

4. Никитин В. Н., Сахарова Е. Ю., Червова А. Е. Создание макетных снимков площадной аэрофотосъемки с использованием ArcGIS // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 95–100.

5. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезических и фотограмметрических задач // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 41–45.

6. Никитин В. Н., Сидякина А. Е. Методика моделирования цифровых реалистичных макетных снимков с использованием машинной графики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 33–38.

7. Семенцов А. В. Калибровка камер без использования твердых опорных данных // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 26–30.

8. Семенцов А. В., Никитин В. Н. Влияние нестрогого соблюдения геометрических условий на точность определения элементов внутреннего ориентирования при калибровке камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 72–80.

9. Семенцов А. В. Разработка тест-объекта для калибровки цифровых камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012 : VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : сб. молодых учёных СГГА. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 60–65.

10. Черемушкин А. В. Тест-объект для калибровки фотографических систем // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 116–118.

© А. В. Семенцов, В. Н. Никитин, 2015

УДК 528.711.11

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КАЛИБРОВКИ КАМЕР, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИК И МОДЕЛЕЙ ДИСТОРСИИ

Андрей Владимирович Семенцов
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий научно-производственной лабораторией «ТЕМПУС» в Центре геоинформационных компетенций, тел. (960)779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

Вячеслав Николаевич Никитин
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

В статье предлагается новая методика, позволяющая выполнять сравнение параметров, полученных разными методиками калибровки камер. Суть методики заключается в сопоставлении восстановленных связок лучей. Приведены результаты практических экспериментов.

Ключевые слова: калибровка камер, сравнение параметров, связка лучей, внутреннее ориентирование снимков, дисторсия объектива.

COMPARISON OF CAMERA CALIBRATION PARAMETERS OBTAINED BY DIFFERENT METHODS AND MODELS OF DISTORTION

Andrey V. Sementsov
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., head of scientific and production laboratory «TEMPUS» of the center of geoinformation competencies, tel. (960)779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

Vyacheslav N. Nikitin
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Assoc. Prof. of department of physical geodesy and remote sensing, tel. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

The article proposes the new method which allows to perform a comparison of the parameters obtained by different methods of camera calibration. Essence of the method consists in comparing the reconstructed bundles of beams. The results of practical experiments are shown.

Key words: camera calibration, comparison of parameters, bundle of beams, interior orientation of images, lens distortion.

В настоящее время существует большое разнообразие методик калибровки цифровых камер [1,4,5,14]. Это обусловлено активным внедрением неметрических цифровых камер в производственный процесс – для решения различных измерительных задач [2,3,9,13].

При этом одним из сложных вопросов остаётся обоснование методов калибровки, так как не всегда можно провести полноценный анализ систем урав-

нений, положенных в их основу. Поэтому желательно выработать какой-либо критерий оценки достоверности исследуемых методов.

С измерительной точки зрения фотоаппарат является угломерным инструментом, то есть измеряет направления на все точки, изобразившиеся на снимке. Это обстоятельство подчёркнуто в термине «связка лучей», то есть изображение на снимке это всего лишь фиксация направлений на объекты местности («проектирующих лучей») на носителе («снимке»). Конечно, виды связок лучей бывают разные, как и поверхности, на которые изображение проектируется, но для центральной проекции все проектирующие лучи пересекаются в одной точке («центре проекции», «центре фотографирования») и, по существу, фотоаппарат является аналогом теодолита, только без ориентирующих устройств в виде уровней и компенсаторов.

Согласно определению, калибровка измерительных приборов заключается в установлении зависимости между показаниями средства измерительной техники (прибора) и размером измеряемой (входной) величины. Так как фотокамера является угломерным инструментом, то и в качестве эталона должны выступать углы. В пределе, это совокупность всех угловых измерений, т.е. связка лучей.

Отличительной особенностью калибровки с использованием эталонной связки лучей следует отметить возможность определения неравномерной дисторсии, в пределе для каждой измеренной точки снимка.

Идеальными, согласно данной точки зрения, являются способы калибровки по звёздному небу (огромное количество «эталонных» углов) [7] и способ, в котором координаты центра фотографирования и точек на местности известны (это позволяет перейти к направлениям на точки) [4,5,14]. Также сюда можно отнести методы, использующие ганиометры.

Следует отметить, что широко распространённый способ калибровки по пространственному тест-объекту не использует эталонную связку лучей: связка лучей восстанавливается в соответствии с моделью дисторсии, соответственно данный способ в каноническом виде (по одному снимку) не способен определить неравномерную дисторсию.

Таким образом, учитывая угломерную функцию фотоаппарата, можно предположить способ сравнения результатов определения параметров дисторсии (включая элементы внутреннего ориентирования) на основе сопоставления связок лучей.

Алгоритм сравнения связок лучей при этом выглядит следующим образом:

1) переход от координат точек снимка к пространственным векторам с учётом модели дисторсии;

2) совмещение связок лучей путём «доворота» одной из связок в соответствии с оптимизирующей функцией;

3) для оценки точности совмещения связок лучей предлагается использовать СКО соответственных лучей, выраженных в секундах. Для малых значений углов можно использовать упрощённую формулу, основанную на разности нормированных векторов:

$$m''_{\Delta\alpha} = \sqrt{\frac{\sum \left\| \frac{\bar{X}_{2i}}{\left\|\bar{X}_{2i}\right\|} - \frac{\bar{X}_{1i}}{\left\|\bar{X}_{1i}\right\|} \right\|^2}{n}} \cdot \rho'', \qquad (1)$$

где $m''_{\Delta\alpha}$ – СКО совмещения двух связок лучей;

$\bar{X}_{1i}$, $\bar{X}_{2i}$ – векторы направления на точку i для первой и второй связки лучей соответственно;

ρ'' – константа, необходимая для перехода от радиан к угловым секундам;

n – количество лучей в связке лучей.

Графическая схема сравнения связок лучей, полученных при разных наборах калибровочных параметров, приведена на рис. 1.

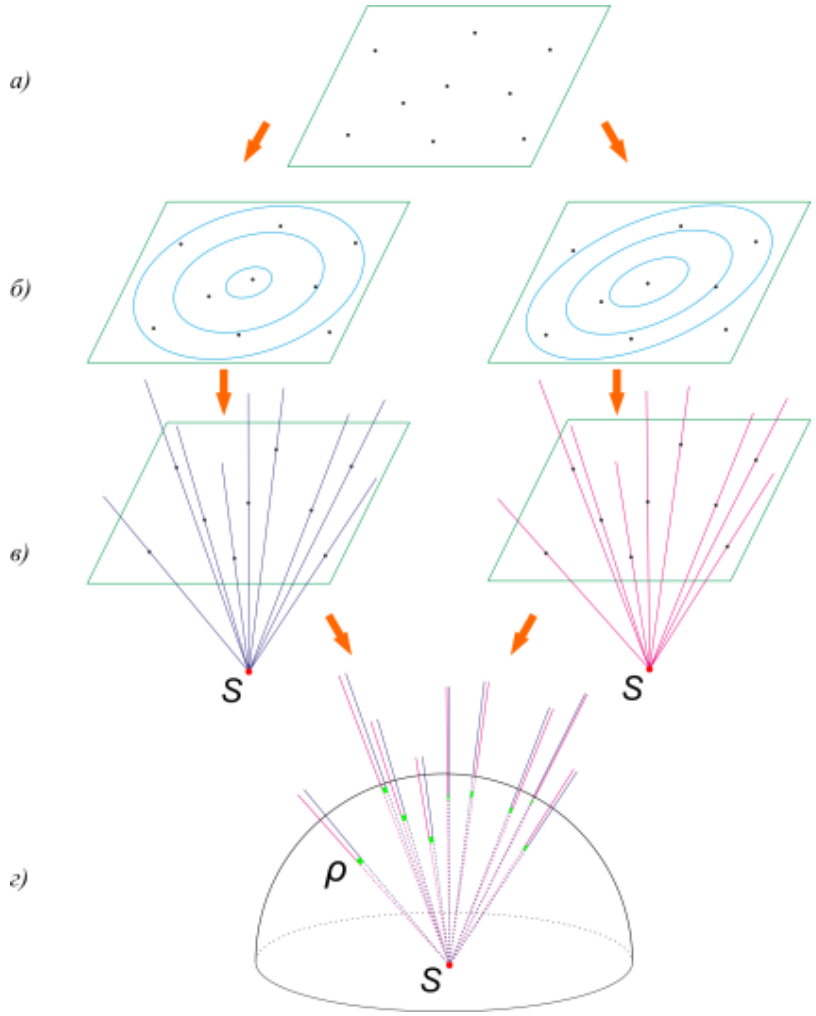


Рис. 1. Схема сравнения параметров калибровки по этапам:
а) определение расположения точек на снимке; *б)* исправление координат точек с учётом параметров дисторсии; *в)* восстановление связок лучей; *г)* сравнение полученных связок лучей

Также следует отметить, что сравнить результаты калибровки, полученные разными методиками, простым попарным сопоставлением параметров досто-

верно невозможно. В случае, когда для описания дисторсии в сравниваемых методах используются разные модели и, соответственно, разные коэффициенты, это в принципе не осуществимо. А в случае использования некой общей модели описания дисторсии параметры могут существенно отличатся, так как коэффициенты оказывают сложное, нелинейное влияние на значение дисторсии и иногда в значительной степени коррелируют друг с другом.

Для проверки работоспособности предложенной методики были проведены эксперименты по определению параметров калибровки разными способами с использованием реальных снимков для камеры Sony Alpha NEX-5R с объективом E 16mm F2.8:

– по снимку звёздного неба [7];

– по пространственному тест-объекту (классический подход);

– по плоскому тест-объекту [6];

– без использования координат опорных точек [10] с применением математического описания смещения центра фотографирования [11] и использованием дополнительного геометрического условия [8], согласно которому взаимное расположение марок соответствует шаблону [12].

Обработка данных по каждому варианту калибровки выполнена в вычислительной среде Equilibrium. В качестве модели искажений связки лучей использована полиномиальная модель радиальной дисторсии, принятая в ЦФС PHOTOMOD.

Согласно описанному выше подходу, сравнение результатов разных вариантов калибровки выполнялось путём сопоставления полученной связки лучей с эталонной. В качестве эталонной связки лучей использовались направления на звёзды, относительное положение которых, как известно, отличается высокой стабильностью.

Пример схемы расчета сравнения связок лучей представлен на рис. 2:

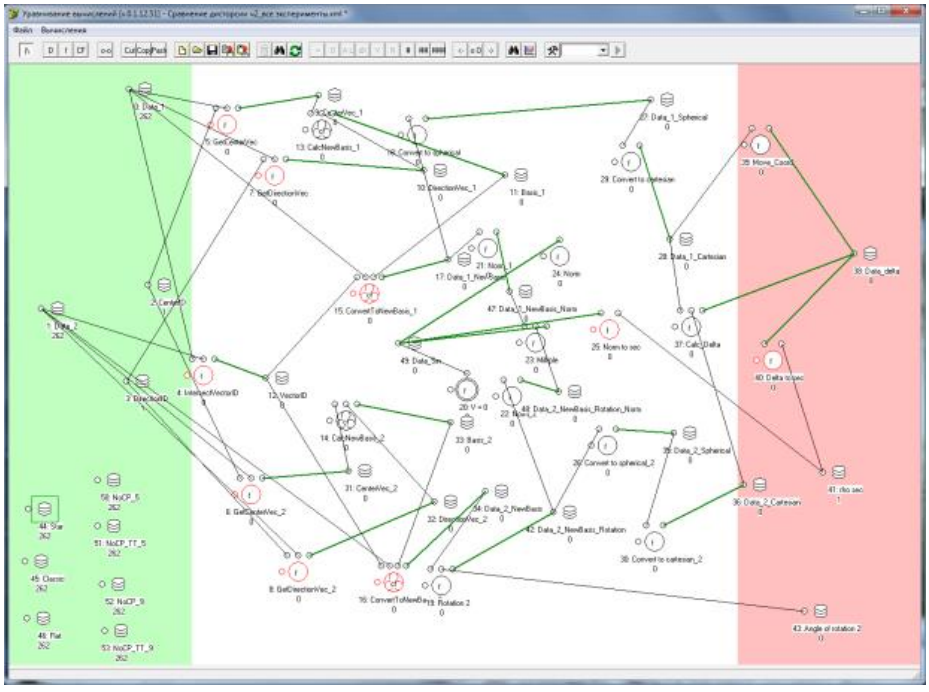


Рис. 2. Схема расчета сравнения связок лучей в программе Equilibrium

Полученные результаты оценки точности различных методик калибровки согласно формуле (1) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнения полученных связок лучей с эталонной

Вариант калибровки	Количество снимков	Количество измеренных точек	μ, пикс	СКО, $m_{\Delta\alpha}$, "
По снимку звёздного неба	1	262	0,511	38,118
По пространственному тест-объекту (классический вариант)	3	436	0,483	75,799
По плоскому тест-объекту	2	277	0,397	86,952
Без координат опорных точек (с условием шаблона)	9	1044	0,779	50,386
Угловой размер центрального пикселя согласно расчетам составляет ≈ 62"				

Из табл. 1 видно, что наилучшие результаты показали варианты калибровки по снимку звёздного неба и по девяти снимкам без использования координат опорных точек с применением условия шаблона. Остальные варианты показали близкие результаты: среднее квадратическое отклонение связок лучей от эталонной изменялись в пределах от 75" до 87".

Следует пояснить, что отклонение, полученное для варианта калибровки по снимку звёздного неба, объясняется погрешностями работы оператора при измерении координат точек на снимке, а также рефракцией атмосферы и незначительным смазом изобразившихся на снимке звёзд за счёт выдержки фотоаппарата в 4 секунды при экспонировании.

Пример результата сравнения связок лучей в графическом виде представлен на рис. 3.

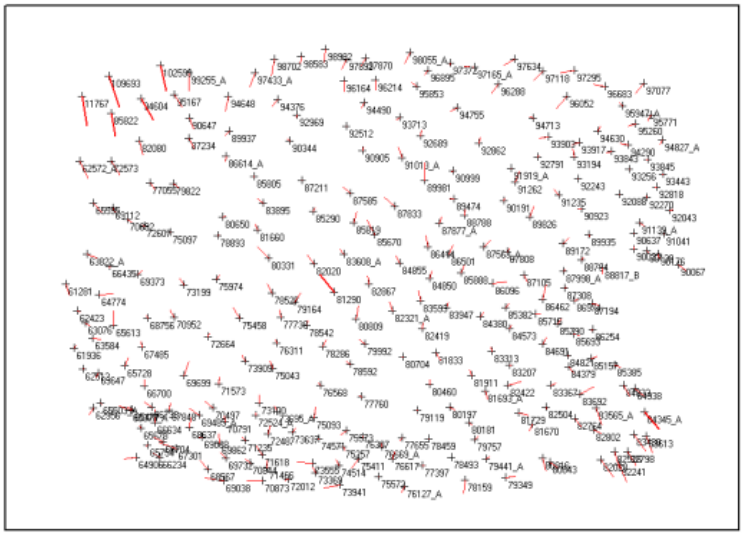


Рис. 3. Сравнение связки лучей, полученной при калибровке без использования координат опорных точек (по девяти снимкам с условием шаблона) с эталонной связкой лучей

Для примера, представленного на данном рисунке (рис. 3), максимальное отклонение проектирующих лучей составило 158,8 угловых секунд, а среднее квадратическое отклонение 50,4 угловых секунд.

Таким образом, результаты проведённых экспериментов с использованием реальных снимков свидетельствуют о возможности применения разработанных методик калибровки для определения элементов внутреннего ориентирования и параметров дисторсии неметрических цифровых камер, а также о работоспособности предложенной методики сравнения результатов калибровки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белошапкин М. А., Гук Н. А. Калибровка цифровых камер по линейному тест-объекту // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 121.

2. Ессин А. С., Ессин С. С. Особенности фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки с БПЛА // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 80–82.

3. Ессин А. С., Ессин С. С. Технология фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, полученных с БПЛА, в целях создания ортофотопланов // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 72–75.

4. Исследование методики калибровки снимков на испытательном полигоне Западносибирского филиала «Госземкадастрсъемка» ВИСХАГИ / Быков А. Л., Быков В. Л., Быков Л. В., Макаров А. П. // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 32–34.

5. Калибровка снимков на равнинном испытательном полигоне с определением координат центров фотографирования / Макаров А. П., Быков Л. В., Быков В. Л., Быков А. Л. // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 60–62.

6. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2014. – № 2. – С. 71–80.

7. Никитин В. Н., Николаева Т. В. Калибровка цифровой неметрической камеры по снимкам звёздного неба // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 7–11.

8. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезических и фотограмметрических задач // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 41–45.

9. Пошивайло Я. Г. Применение цифровых неметрических камер для целей крупномасштабного картографирования // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 4. – С. 125–128.

10. Семенцов А. В. Калибровка камер без использования твердых опорных данных // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 26–30.

11. Семенцов А. В., Никитин В. Н. Влияние нестрогого соблюдения геометрических условий на точность определения элементов внутреннего ориентирования при калибровке камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей

среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 72–80.

12. Семенцов А. В. Разработка тест-объекта для калибровки цифровых камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012 : VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : сб. молодых учёных СГГА. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 60–65.

13. Смирнов Е. С., Пальчикова И. Г. Калибровка цифровых камер для микроскопной цитометрии // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 48-53.

14. Черемушкин А. В. Тест-объект для калибровки фотографических систем // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 116–118.

© А. В. Семенцов, В. Н. Никитин, 2015

УДК 528.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ «ИСТИННЫХ» ОРТОФОТОПЛАНОВ (TRUE ORTHO) В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Лариса Геннадьевна Евстратова
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», 119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории аэрокосмических исследований кафедры картографии и геоинформатики географического факультета, тел. (495)939-50-42, e-mail: lge_21@mail.ru

Окружающая человека среда является основным объектом изучения в географических исследованиях. Ортофотопланы являются актуальным источником информации. Показана геометрия возникновения «мертвых зон» на ортофотопланах с изображением городской территории. Рассмотрена возможность получения «истинного» ортоизображения – true ortho.

Ключевые слова: аэрокосмические снимки, «мертвые зоны», ортотрансформирование.

USING OF THE TRUE ORTHOPHOTO FOR GEOGRAPHIC RESEARCHES

Larisa G. Evstratova
Moscow State University, 119991, Russia, Moscow, 1 Leninskiye Gory, Ph. D., Laboratory of Aerospace Methods, Faculty of Geography, Researcher, tel. (495)939-50-42, e-mail: lge_21@mail.ru

Surrounding environment is a main object of study for geographic researches. The orthophoto is actual source of the information. The geometry of the hidden area appearance especially for images over urban areas is presented. Possibility of generation of a true orthophoto is considered.

Key words: airspace images, hidden area, true orthophoto.

В настоящее время в географических исследованиях широко используются аэрокосмические изображения, т.к. они являются одним из основных источников информации о Земле.

Используя космические снимки различного разрешения можно выявить границы естественных образований, а затем уточнить их положение, используя космические снимки более высокого разрешения или аэрофотоснимки и определить разнородные характеристики поверхности, объектов [1].

Получение своевременной информации о состоянии территорий и объектов основано на использовании современных космических средствах, методах сбора и обработки данных. Для специалистов, исследующих природные и природно-общественные геосистемы, наиболее эффективным инструментом моделирования и анализа являются географические информационные системы (ГИС). Для отображения пространственной информации о поверхности Земли используются карты разных видов и масштабов. Это топографические, географические, геологические, лесоустроительные, кадастровые карты и т.д. Однако, использование карт в качестве основы для ГИС иногда бывает просто невозможно, так как многие топографические и другие карты не обновлялись на протяжении 20 – 30 лет и не соответствуют состоянию местности. В связи с интен-

сивным развитием космических съемочных систем одним из основных методов обновления карт стало обновление по материалам космических съемок.

Трансформирование является неотъемлемым элементом обработки аэрокосмических снимков при получении по ним метрической информации. Этот процесс существенно влияет на качество выполнения мониторинга по многозональным космическим снимкам, т.к. для эффективного выявления изменений необходимо в первую очередь тщательное совмещение информации [2].

Цифровое трансформирование и ортотрансформирование снимков выполняется с конца 70-х гг. прошлого века. Трансформирование снимков на имеющихся ЭВМ занимало тогда до нескольких часов. Но именно в то время были разработаны основные подходы и методы трансформирования [3]. На смену метода прямого трансформирования, где требовалось выполнять интерполяцию для заполнения пропусков и наложений, пришел метод обратного трансформирования, свободный от этих недостатков и позволяющий без интерполяции получать трансформированное изображение.

Были разработаны методы ортотрансформирования, которые учитывают смещения точек на снимке вследствие влияния рельефа местности [3, 4]. Информацию о рельефе дает цифровая модель рельефа, которая может быть получена как в результате стереофотограмметрической обработки снимков, так и любым другим способом (картографическим, геодезическим, из радиолокационной интерферометрии и т. д.).

Однако объектом изучения географов и геоэкологов являются экосистемы, представленные различными природно-антропогенными комплексами, в частности городские территории.

На ортоснимках с изображением городских территорий даже после выполнения ортотрансформирования имеются зоны, которые не соответствуют изображению местности. Это так называемые «мертвые зоны», т. е. зоны, которые не отображаются на ортотрансформированном снимке вследствие того, что снимок является центральной проекцией местности [5]. Объекты, возвышающиеся над поверхностью земли, закрывают часть местности. Она то и не изображается на снимке (рис. 1). Кроме того, на изобразительное качество ортофотоплана будут влиять зоны, закрытые тенью от объекта.

В 80 – 90-х годах были разработаны методы позволяющие устранять «мертвые зоны» на ортотрансформированном снимке, такой способ получил название «True ortho».

Как видно из рис. 1, размер области S_M, закрытой объектом, зависит от положения точки съемки относительно объекта и от его высоты, а размер области тени S_T – от положения источника излучения (Солнце) относительно объекта. Область тени не зависит от положения объекта, и тень будет и на снимке II, который в то же время не имеет «мертвой зоны» от соответствующего объекта на первом снимке.

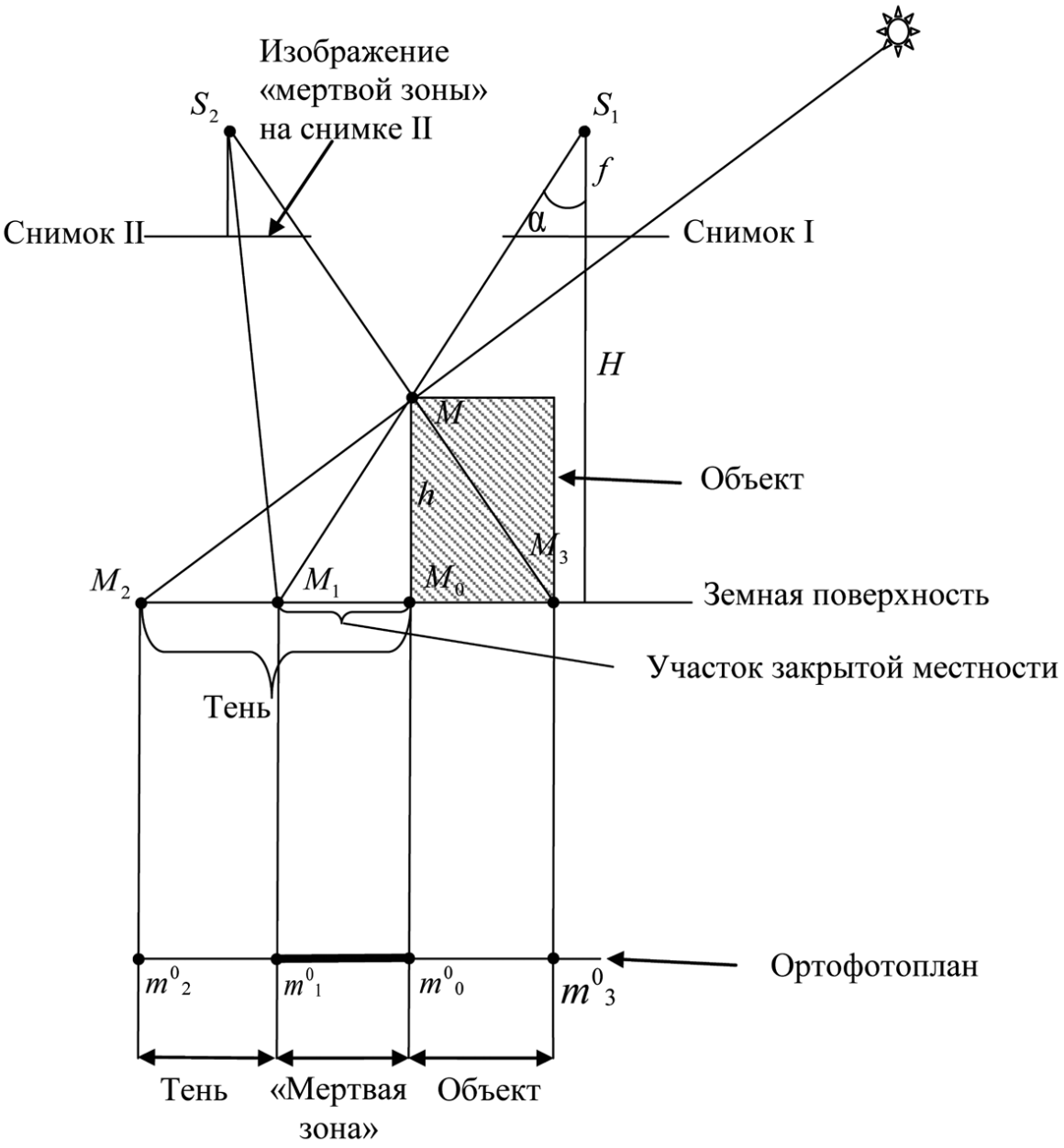


Рис. 1. Формирование «мертвых зон» и теней на снимке

Область зоны, закрытой объектом местности, определяется направлением на него проектирующего луча из точки S_1 и объектом с высотой h над поверхностью Земли:

$$S_M = h\mathrm{tg}\alpha, \qquad (1)$$

где $\mathrm{tg}\alpha = X/H$; X – расстояние от надира до точки M; H – высота фотографирования.

Размер тени определяется положением Солнца относительно объекта и зависит от высоты объекта $S_T = h\mathrm{tg}h_\theta$. На снимке тень будет занимать участок изображения, S_T/m, где m – знаменатель масштаба снимка. Соответственно при

одной высоте съемки снимки, полученные длиннофокусными АФА, будут иметь меньший размер области тени.

Устранить тень можно путем «выравнивания» яркостей на затененной области – растяжением диапазона яркостей в области тени на весь рабочий диапазон.

Для устранения «мертвой зоны» используется соседний снимок II, на котором изобразилась соответствующая часть местности. Нужно перенести со снимка II на снимок I соответствующее изображение закрытого на нем участка. Однако следует заметить, что на снимке II область также останется закрытой тенью. Поэтому предварительно необходимо выполнить процедуру «выравнивания» яркостей.

Для эффективного устранения «мертвых зон» необходимо выполнить аэрофотосъемку с продольным перекрытием 80% и с поперечным – более 30%.

Сущность метода построения «истинного» ортофотоплана заключается в определении положения «мертвых зон»: нахождении на соседних снимках изображения, соответствующего «мертвой зоне», и заполнения ее на ортотрансформированном снимке этим изображением. Для этого необходимо выполнить «true ortho» – «истинное ортотрансформирование» каждого снимка используя не только цифровую модель рельефа, но и цифровую модель объектов (ЦМО) зданий, сооружений, деревьев и т. п., «закрывающих» другие объекты местности.

При ортотрансформировании космических снимков этот метод сложно использовать, так как стереопары космических снимков получают путем съемки с соседних орбит с отклонением оптической оси. Поэтому метод весьма, дорогой и трудоемкий. Для устранения влияния теней пользуются тем, что космические снимки имеют широкий динамический диапазон и используя методы изменения гистограммы и методы фильтрации получают приемлемое изображение в области тени [6].

Таким образом, ортофотопланы используют как новый вид информации, они могут содержать различную тематическую информацию, в зависимости от требований пользователя, поэтому ортофотоплан несет в себе как метрическую информацию, т.е. соответствует определенной метрической точности, так и тематическую информацию. Кроме этого по современным космическим стереоснимкам можно построить пространственную модель местности, на основании которой можно получить 3D модель и соответственно использовать ее как для анализа природных ресурсов, так и городской территории. Причем плановой основой 3D модели является ортофотоплан.

На основе ортофотопланов получают следующие виды продукции:

– топографические и кадастровые карты масштабов 1:5000 - 1:100000, выполняется обновление карт масштаба 1:2000 – 1:100000;

– карты изменений местности путем обработки ортофотопланов, полученных на различные даты и использование процедур «выявления изменений» Change Detection;

– базовую пространственную основу для информационного обеспечения и обновления данных в ГИС;

– основу для 3D моделирования поверхности.

В заключение хочется отметить, что современный географ-картограф должен быть знаком с методами цифровой обработки изображений, понимать сущность алгоритмов применяемых при анализе изображений в современных программных комплексах, чтобы целенаправленно использовать знания для дешифрирования аэрокосмических снимков с целью создания карт и решения метрических задач, возникающих при географических исследованиях. [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гук А. П., Евстратова Л. Г., Алферова А. С. Комплексный анализ космических снимков для выявления изменений при мониторинге территорий // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 2. – С. 181–185.

2. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических снимков. Выявление изменений состояния территорий и объектов по многозональным космическим снимкам, полученным на разные даты / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, Е. П. Хлебникова, М. А. Алтынцев, С. А. Арбузов, А. С. Гордиенко, А. А. Гук // Геодезия и картография. – 2013. – № 8. – С. 39–47.

3. Лобанов А. Н. Фотограмметрия : учебник для вузов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.

4. Евстратова Л. Г. Трансформирование космических снимков с использованием программного комплекса ENVI: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 53 с.

5. Евстратова Л. Г. Создание «реальных» ортофотопланов (True Ortho) по аэрофотоснимкам с использованием программного комплекса INPHO // Геодезия и картография. – 2011. – № 3. – С. 29–32.

6. Bang K. I., Habib A. F., Shin S. W., Kim K. O. Comparative Analysis of Alternative Methodologies for True Ortho-photo Generation from High Resolution Satellite Imagery / ASPRS 2007 Annual Conference Tampa, Florida, May 7–11, 2007.

7. Трёхмерное аэрокосмическое моделирование: учеб. пособие / Ю. Ф. Книжников, О. В. Вахнина, Е. Г. Харьковец, А. К. Ильясов, Л. Г. Евстратова, М. С. Шахмина; Под ред. Ю. Ф. Книжникова. – М.: изд. геогр. ф-та МГУ, 2011. – 216 с.

© Л. Г. Евстратова, 2015

УДК 528.7

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ НА ТЕРРИТОРИИ ШАХТЫ ИМЕНИ КОСТЕНКО

Дмитрий Владимирович Мозер
Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, (701)738-82-23, e-mail: dmitri-moser@yandex.ru

Асем Сериккызы Туякбай
Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (771)129-03-37, e-mail: assem_jan@mail.ru

Надежда Ивановна Гей
Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистрант кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (702)691-71-26, e-mail: nadya11-06@mail.ru

Айнур Дюсембаевна Каранеева
Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, магистрант кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (700)998-01-88, e-mail: aijarkyn83@inbox.ru

Айгерим Рахмановна Естаева
Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, инженер кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (705)334-48-66, e-mail: estaeva_a@mail.ru

В статье приводится результаты мониторинга подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна. Мониторинг проводился с использованием спутниковых радарных данных COSMO-SkyMed, Италия. Обработка космических снимков производилась по методике Sbas в программном комплексе ENVI. В результате обработки получены очаги оседаний земной поверхности, которые находятся в непосредственной близости от жилых объектов, по которым также проходят линии электропередач и автомобильная трасса республиканского значения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, интерферограмма, мониторинг, спутниковая радарная интерферометрия, мульда оседания.

MONITORING OF DEFORMATIONS OF THE EARTH SURFACE BY METHOD OF THE SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY IN THE AREA OF KOSTENKO MINE

Dmitri V. Mozer
Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, Candidate of technical sciences, senior teacher of the department «Mine survey and geodesy», tel. (7212)56-26-27, (701)738-82-23, e-mail: dmitri-moser@yandex.ru

Assem S. Tuyakbay
Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, master of technical sciences, senior teacher of the department «Mine survey and geodesy», tel. (771)129-03-37, e-mail: assem_jan@mail.ru

Nadezhda I. Gey
Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, master student of the department «Mine survey and geodesy», tel. (702)691-71-26, e-mail: nadya11-06@mail.ru

Ainur D. Karaneyeva
Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, master student of the department «Mine survey and geodesy», tel. (700)998-01-88, e-mail: aijarkyn83@inbox.ru

Ajgerim R. Estajeva
Karaganda state technical university, 100027, Kazakhstan Republic, Karaganda, 56 Mira Blvd, engineer of the department «Mine survey and geodesy», tel. (705)334-48-66, e-mail: estaeva_a@mail.ru.

The article presents the results of monitoring of the undermined territories of Karaganda coal basin. Monitoring was conducted using of radar space pictures from the COSMO-SkyMed satellite, Italy. Processing of space pictures was made by the Sbas technique in the ENVI program. As a result of processing the centers of deformations of the earth surface are received. They are in close proximity to inhabited objects on which also there pass power lines and the automobile roads of national importance.

Key words: remote sensing of Earth, interferogram, monitoring, satellite radar interferometry, basin subsidence.

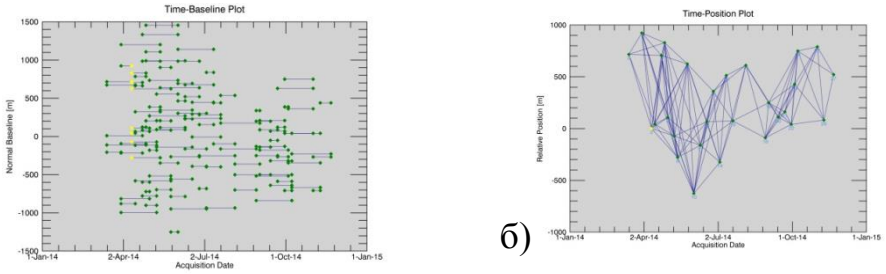
Выявление процесса сдвижения земли и предотвращение угрозы обрушения возможно при проведении масштабного мониторинга. Для оперативного мониторинга значительных площадей подработанной горными выработками дневной поверхности, необходимо определить метод позволяющий осуществить его в реальном времени и с высокой точностью.

На протяжении нескольких лет в Караганде постоянно происходят чрезвычайные ситуации: обрушение здания в микрорайоне Бесоба, прорыв плотины в селе Кокпекты, землетрясения амплитудой 4,8, на местных промышленных железнодорожных путях сходят железнодорожные составы. Для оперативного мониторинга подработанной горными выработками земной поверхности нами предложен метод спутникового радарного мониторинга.

В настоящей статье рассматриваются вопросы космического радарного интерферометрического мониторинга деформаций земной поверхности на территории Карагандинского угольного бассейна.

Обработка 22 радарных космических снимков со спутника COSMO-SkyMed (Италия) за период с апреля по начало ноябрь 2014 года производилась в программном комплексе ENVI модуль SarScape Interferometric Stacking по технологии SBas.

Поскольку к смещениям земной поверхности наиболее чувствительны интерферометрические пары, характеризующиеся малыми перпендикулярными компонентами базовых линий, отбираем именно их для дальнейшей обработки. Для отбора пар и дальнейшей обработки был установлен порог базовых линий – до 30% от критической базовой. Кроме того, чтобы избежать выбора пар с сильной временной декорреляцией, было установлено максимальное значение временной базы в 45 суток (рис. 1).



а) б)

Рис. 1: а) определение базовых линии снимков относительно друг друга; б) определение пространственного положения снимков относительно друг друга

Обработка каждой пары ведется в полуавтоматическом режиме с выполнением нижеуказанных четырех шагов:

1. Автоматическая корегистрация, расчет интерферограммы, синтез фазы рельефа, вычитание фазы рельефа из интерферограммы, фильтрация дифференциальной интерферограммы, расчет когерентности, развертка фазы;

2. Набор точек с известными координатами и высотами для коррекции орбитальных параметров;

3. Расчет скорректированных дифференциальных интерферограмм и развернутых фаз;

4. Инверсия полученных перекрестных во времени развернутых фаз по методике SBas с восстановлением последовательной во времени истории смещений. При этом в итоге также восстанавливается хронология смещений от первого снимка цепочки до последнего.

После анализа дифференциальной интерферограммы, полученной в ходе обработки, были выявлены участки, на которых образовались мульды оседания. Данные мульды оседаний земной поверхности расположены в районах добычи угля шахт имени И. А. Костенко, имени Т.Кузембаева, «Абайская» и «Саранская».

Наибольшие оседания сформировались вблизи территории шахты имени И. А. Костенко - крупнейшем угледобывающем предприятии угольного департамента компании АО «АрселорМиттал Темиртау».

За годы работы в составе УД АО «АрселорМиттал Темиртау» шахтой им. Костенко добыто 16,5 млн тонн угля, пройдено более 47 км горных выработок. Наиболее мощные угольные пласты - К10, К12. средняя подсвита расположена от почвы пласта К6 до почвы пласта К15. мощность подсвиты 320-325 метров.

По состоянию на 2014 год велись работы по пластам К2, К3, К10. Мощность вынимаемого пласта К1 составляет 3,8 м. Средняя абсолютная отметка пласта равна -81м.

На рис. 2 отчетливо видно образование мульд оседаний, увеличивающихся во времени.

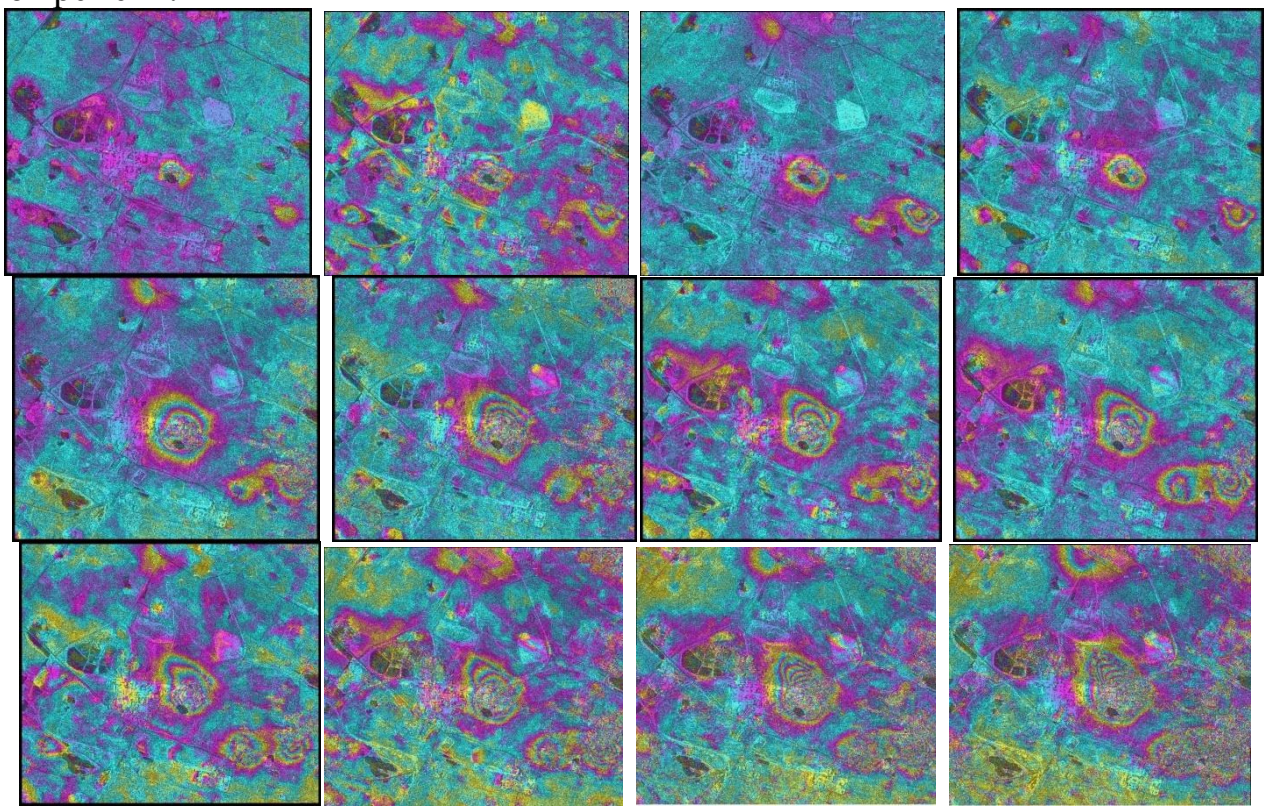
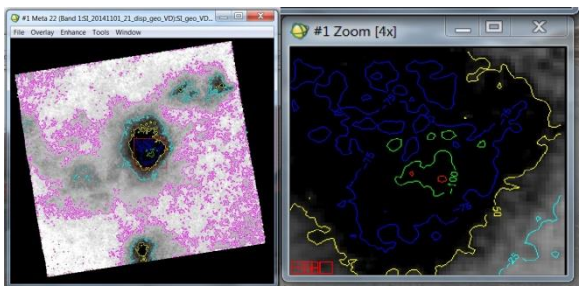


Рис. 2. Дифференциальные интерферограммы оседаний земной поверхности в районе шахты имени Костенко

Для дальнейшего проведения исследований в ноябре 2014 года были закуплены 6 космических снимков за март и ноябрь 2014 года со спутника COSMO-SkyMed. Аналогичная обработка производилась со всеми парами 28 серий снимков.

Для визуализации и сравнения смещений земной поверхности за период исследования в программном комплексе ENVI были построены изолинии по 22 и 28 космическим снимкам (рис. 3).

а) 

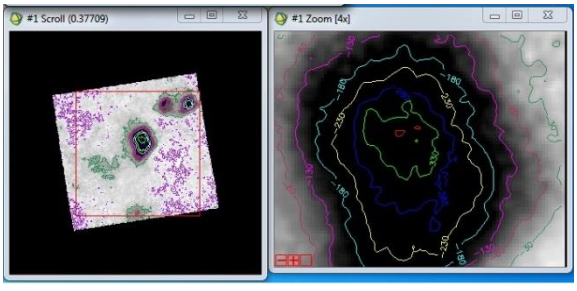
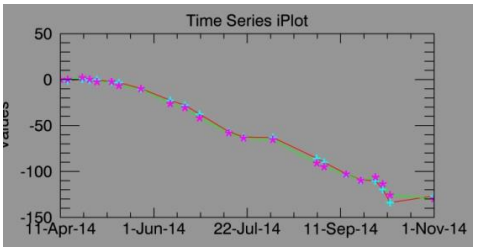
б) 

Рис. 3. Мульды оседаний, полученные в программном комплексе ENVI:
а) по 22 сериям снимков; б) по 28 сериям снимков

Анализ результатов мониторинга смещений земной поверхности по 28 сериям снимков (рис. 3, б) показал образование мульд оседаний, ускоряющихся во времени.

По результатам обработки возможно построение временных рядов оседаний одной и той же точки. Для сравнения были построены графики оседаний земной поверхности по точке его максимального оседания по 22 и 28 парам снимков (рис. 4). Так из графиков построенных по результатам обработки на шахте имени Костенко видно, что оседание в период с апреля по начало ноября составляет 130мм (рис. 4,а), а с марта по конец ноября, результаты показали оседания равные 380мм (рис. 4,б).

а) 

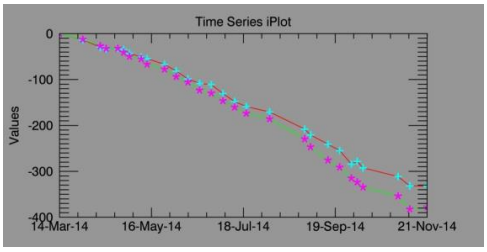
б) 

Рис. 4. Максимальная величина оседания земной поверхности в районе ведения работ на шахте имени Костенко: а) по 15 сериям снимков; б) по 22 сериям снимков

Обработанные интерферограммы по 15 снимка показали максимальное оседание 150 мм, что не соответствовало проводимым геотехническим расчетам за определенным период времени. Обработка по 22 снимкам велась в с изменением временного базиса при обработке интерферометрическихпар. Результаты показали, что оседаний за отечный период равно 400 мм, Данные результаты оседаний хорошо коррелируют с результатами геотехнических расчетов. Увеличение мульд оседаний на территории шахты в дальнейшем может привести к разрушению автомобильного покрытия, а также к разрушению линии электропередач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кантемиров Ю.И. Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций Ps и SBas // Журнал Геоматика. – 2012. – № 1. – С. 22–26.

2. Кантемиров Ю.И. Обзор возможностей новой версии SARscape 4.4 //Журнал Геоматика. – 2012. – № 1. – С. 44–45.

3. Ожигин С.Г., Низаметдинов Ф.К., Ожигина С.Б., Ожигин Д.С., Инновационные методы мониторинга состояния устойчивости горных пород и земной поверхности, Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 1. № 1. С. 135-140.

4. Низаметдинов Ф. К., Мозер Д. В., Гей Н. И., Туякбай А. С., Каранеева А. Д. Спутниковый радарный интерферометрический мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна, Журнал «Геоматика» №4, 2014г.

5. Панжин А.А. Результаты наблюдений за деформациями породных массивов методами спутниковой геодезии // Сборник трудов международной конференции "Геодинамика и напряженное состояние недр Земли". - Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.

6. Busch, W., Hebel H.-P., Schaefer, M., Walter, D. and A. Baryakh. Control of underworked areas subsidence using the radar Interferometry methods. In: Mine Surveying and Subsurface Use, No 2 (40), March-April 2009, pp. 52−57

7. Kashnikov Y.A., Musikhin V.V., Lyskov I.A. Radar interferometry - based determination of ground surface subsidence under mineral mining// Journal of Mining Science, Издательство: Springer New York Consultants Bureau. - 2012. Том: 48, №4, - С. 649-655.

© Д. В. Мозер, А. С. Туякбай, Н. И. Гей, А. Д. Каранеева, А. Р. Естаева, 2015

УДК 528.722.8

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ЦФС PHOTOMOD С ПОМОЩЬЮ МАРШРУТОВ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЦИФРОВЫХ МАКЕТНЫХ СНИМКОВ

Вадим Сергеевич Коркин
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)236-12-66

Анастасия Евгеньевна Червова
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (923)249-14-10, e-mail Anastliss@mail.ru

В статье представлены результаты обработки двух маршрутов высокоточных макетных снимков. Макеты созданы с идеальными параметрами и параметрами, в которые внесены дополнительные искажения. Сделан вывод о возможности использования неидеальных макетов при тестировании современных ЦФС.

Ключевые слова: цифровые макетные аэроснимки, маршрут, тест-объекты, цифровая фотограмметрическая станция, параметры моделирования.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF TEST RESULTS DPS PHOTOMOD WITH ROUTES HIGH-PRECISION DIGITAL MOCK-UP IMAGES

Vadim S. Korkin
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., associate professor of Department of Photogrametry and Remote Sensing, tel. (383)236-12-66

Anastasia E. Chervova
S Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., postgraduate student of Department of Photogrametry and Remote Sensing, tel. (923)249-14-10, e-mail Anastliss@mail.ru

The article presents the results of the processing of two routes high-precision digital mock-up images. This digital mock-up images created with ideal parameters and parameters, which include additional distortion. It is concluded that the possibility of using non-ideal mock-up images for testing modern DPS.

Key words: digital mock-up images, route, test object, Digital Photogrammetric Station, modeling parameters.

В настоящее время для обработки информации, полученной в результате аэро и космической съемки [1, 2, 3, 4, 5, 6], съемки с беспилотных летательных аппаратов [7, 8, 9] или при воздушном лазерном сканировании [10, 11, 12], используются современные цифровые фотограмметрические станции.

Для того, чтобы удостовериться в точности работы таких станций, необходимо провести их тестирование с помощью высокоточных макетных снимков.

Технология создания и использования цифровых битовых макетных снимков, разработанные авторами, подробно описана в работах [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. В этих статьях подробно рассматривались результаты тестирования ЦФС PHOTOMOD с помощью макетов средней и высокой точности, образующие стереопару, маршрут и блок. При этом все макеты были созданы с идеальными параметрами моделирования. По результатам этих работ был сделан вывод, что для корректной работы целесообразно использовать высокоточные макеты.

В данной работе авторами рассматривается влияние внесенных в параметры моделирования искажений на точность окончательных результатов, полученных при обработке макетов. Для этого были созданы два маршрута, состоящих из пяти высокоточных макетов:

1. Маршрут с идеальными параметрами, пространственное разрешение – 5 мкм, формат кадра 32800×32800 пикселей, точки замаркированы с подпиксельной точностью.

2. Маршрут с большими углами наклона снимков, пространственное разрешение – 5 мкм, формат кадра 32800×32800 пикселей, точки замаркированы с подпиксельной точностью.

Методика создания маршрутов макетных снимков подробно рассмотрена в статье [18]. Данные маршруты будут различаться лишь исходными данными, используемыми при моделировании, а именно углами наклона снимков. Углы наклона макетных снимков для каждого маршрута приведены в табл. 1.

Таблица 1

Углы наклона макетных снимков

	Маршрут №1			Маршрут №2		
	α	ω	χ	α	ω	χ
P_1	0,3	0,1	0,2	3,3	3,1	3,2
P_2	0,2	0,2	0,1	3,5	3,4	3,3
P_3	0,1	0,2	0,1	3,5	3,6	3,8
P_4	0,2	0,1	0,3	3,0	3,5	3,9
P_5	0.1	0.2	0.2	3.1	3.2	3.2

Для получения наиболее точных результатов и корректного их анализа, на снимках обоих маршрутов были замаркированы одни и те же соответственные точки. Оба маршрута были обработаны на ЦФС PHOTOMOD.

На этапе внутреннего ориентирования среднеквадратическая ошибка (далее СКО) на всех координатных метках всех снимков на маршрутах №1 и №2 не превышает 0,001 пиксела.

Для удобства анализа результатов, полученных при обработке маршрутов на этапе взаимного ориентирования, представим их в виде графиков.

На рис. 1 показаны численные значения СКО остаточного поперечного параллакса для каждой стереопары маршрутов №1 и №2.

Как видно из рис. 1, численные значения СКО не превышают 0,1 пиксела.

Значения СКО по составляющим Exy и Ez в тройном перекрытии для обоих маршрутов представлены на рис. 2.

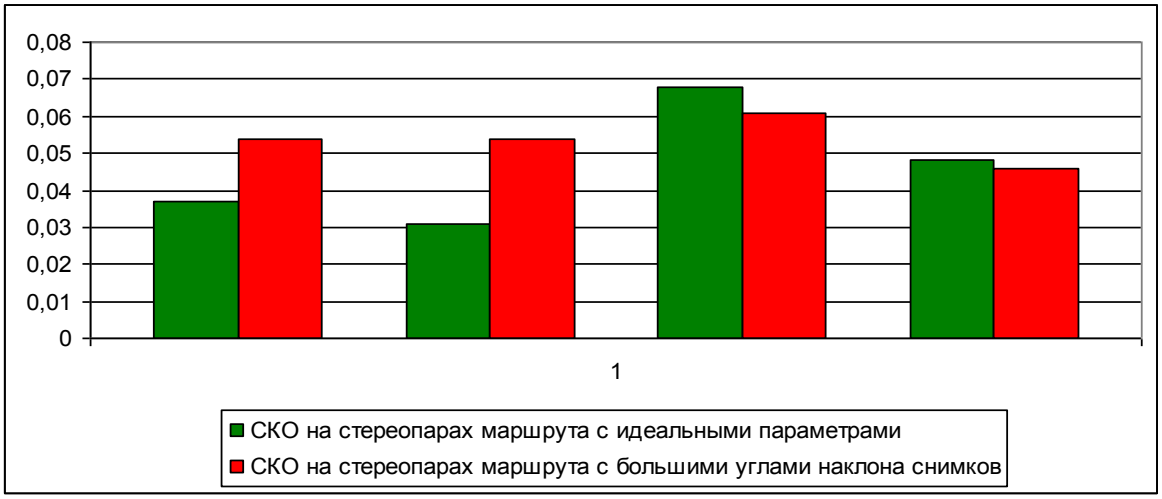
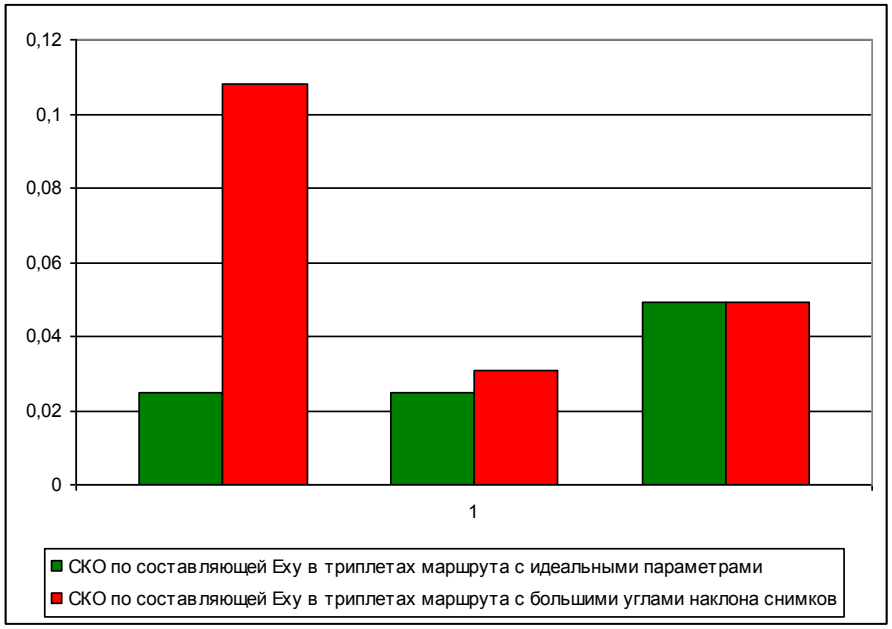


Рис. 1. Значение СКО на этапе взаимного ориентирования для каждого маршрута



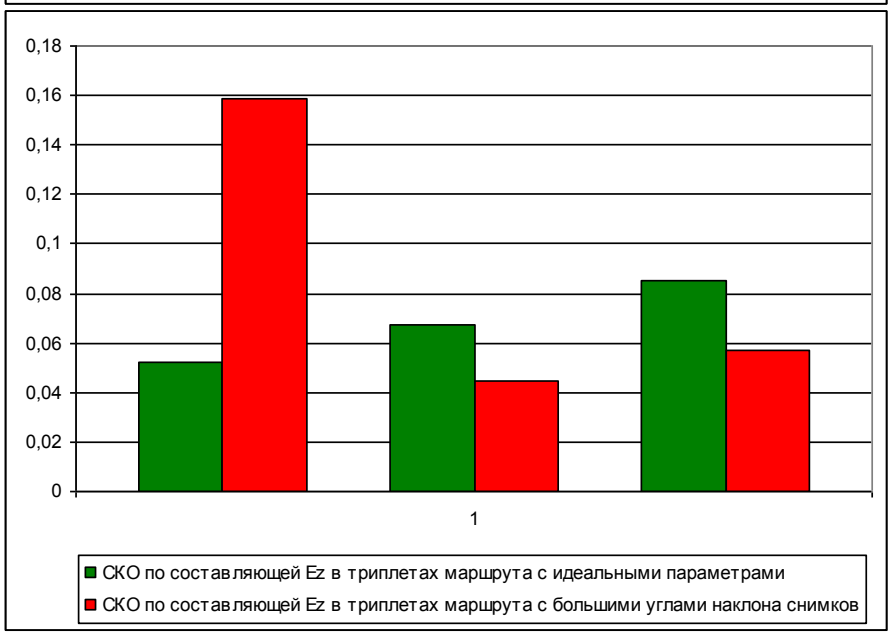


Рис. 2. Графики ошибок в тройном перекрытии на маршрутах № 1 и № 2

Как видно из рис. 2, численные значения СКО в тройном перекрытии не превышают 0,2 пиксела.

Результаты внешнего ориентирования, выполненного по методу связок, представлены в табл. 2.

Таблица 2

СКО на этапе внешнего ориентирования

СКО по опорным точкам	допуск	№ 1, м	№ 2, м
Xcp-Xг	0,200	0,002	0,003
Ycp-Yг	0,200	0,002	0,003
Zcp-Zг	0,200	0,002	0,003
Exy	0,200	0,003	0,004
СКО по контрольным точкам	допуск	№ 1	№ 2
Xcp-Xг	0,200	0,002	0,003
Ycp-Yг	0,200	0,004	0,002
Zcp-Zг	0,200	0,065	0,056
Exy	0,200	0,005	0,004
СКО по связующим точкам	допуск	№ 1	№ 2
Xcp-Xг	0,200	0,000	0,000
Ycp-Yг	0,200	0,001	0,003
Zcp-Zг	0,200	0,002	0,004
Exy	0,200	0,001	0,003

Из приведенных выше результатов обработки маршрутов №1 и №2 видно, что при тестировании ЦФС PHOTOMOD можно использовать и маршруты с идеальными параметрами, и маршруты, состоящие из макетов, в параметры которых внесены дополнительные искажения, например, увеличены углы наклона каждого снимка. Ошибки результатов обработки на всех этапах не превышают 0,2 пиксела. Главным условием для возможности использования таких макетов является их высокая точность на этапе создание, т.е. использование методики маркировки координат координатных меток и связующих точек с подпиксельной точностью [18].

В дальнейшей работе авторы планирую расширить спектр возможных искажений, которые можно внести при моделировании параметров макетных снимков, чтобы максимально приблизить макетные снимки к реальным снимкам, получаем при настоящей аэро и космо съемке, и, соответственно, увеличить область применения таких макетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алтынцев М. А., Гордиенко А. С., Гук А. А. Вейвлет-анализ для выявления вырубок в лесных массивах по аэрофотоснимкам // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 3–8.

2. Гордиенко А. С., Осипова О. Н. Исследование алгоритмов создания и редактирования цифровых моделей рельефа, реализованных в программе PHOTOMOD // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»

: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 38–42.

3. Чермошенцев А. Ю. Создание ортофотопланов по космическим снимкам сверхвысокого разрешения для эффективного управления территориями муниципальных образований // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 4, ч. 1. – С. 60–68.

4. Хлебникова Т. А., Архипова О. Б. Комбинированный способ создания трехмерных топографических планов по материалам аэрокосмических съемок // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 111–115.

5. Гук А. П. Развитие методов автоматизированной обработки многозональных космических снимков высокого разрешения на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 70–73.

6. Широкова Т. А., Чермошенцев А. Ю. Исследование точности визирования на точки стереомодели, построенной по космическим снимкам сверхвысокого разрешения, при различном увеличении изображений разрешения // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3(23). – С. 47– 52.

7. Исследование методики калибровки снимков на испытательном полигоне Западно-Сибирского филиала «Госземкадастрсъемка» – ВИСХАГИ / А. Л. Быков, В. Л. Быков, Л. В. Быков, А. П. Макаров // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 32–34.

8. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезический и фотограмметрических задач разрешения // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4(20). – С. 41–46.

9. Антипов И. Т. Исследование вероятностей оценки точности пространственной аналитической триангуляции // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 2 (15). – С. 50–57.

10. Антипов А. В. Влияние плотности точек воздушного лазерного сканирования на точность создания цифровой модели рельефа местности /// ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 18–23.

11. Широкова Т. А., Антипов А. В. Методика создания ортофотопланов с применением данных воздушного лазерного сканирования // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 2(13). – С. 24–30.

12. Широкова Т. А., Антипов А. В. Методика создания планов крупного мачштаба по данным аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 3(19). – С. 43–51.

13. Коркин В. С., Сидякина А. Е. Проект создания комплекса цифровых макетных аэроснимков для исследования фотограмметрических систем /// ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 4, ч. 1. – С. 72–74.

14. Коркин В.С. Цифровые фотограмметрические тест-объекты для тестирования цифровых фотограмметрических станций // Геодезия и картография. – 2008. – № 2. – С. 39–41.

15. Коркин В. С. Разработка макетных снимков для тестирования цифровых фотограмметрических систем // Современные проблемы геодезии и оптики: материалы междунар. научн.-техн. конф., посвящ. 65-летию СГГА – НИИГАиК, (Новосибирск, 23–24 ноября 1998 г.) – Новосибирск: СГГА, 1998. – С. 62–69.

16. Коркин В. С., Червова А. Е. Разработка алгоритма и программы формирования цифровых макетных снимков, образующих маршрут // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования

Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 88–91.

17. Сидякина А. Е. Алгоритм формирования стереопары битовых макетных снимков для исследования точности работы ЦФС Photomod 5 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 71–77.

18. Коркин В. С., Червова А. Е. Разработка алгоритма и методики создания маршрута макетных цифровых аэроснимков с подпиксельной точностью // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 51–56.

19. Коркин В. С., Червова А. Е. Разработка алгоритма и методики создания блока макетных цифровых аэроснимков высокого класса точности // Инженерные изыскания. – 2014. – № 9. – С. 51–56.

20. Коркин В. С., Червова А. Е. Разработка методики моделирования псевдореалистичных тест-объектов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 72–80.

© В. С. Коркин, А. Е. Червова, 2015

УДК 528.88

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Евгений Игоревич Сапрыкин
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, Новосибирск, ул. Советская, 30, младший научный сотрудник; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)204-33-39, e-mail: eugen_s_2003@mail.ru

Любовь Александровна Сладких
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, Новосибирск, ул. Советская, 30, ведущий специалист, тел. (383)222-33-07, e-mail: sla@rcpod.siberia.net

Екатерина Николаевна Кулик
Сибирский государственный университет геосистем и технологий», 630108, Россия, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют значительно упростить задачу мониторинга состояния посевов в течение всего вегетационного периода, заменив или оптимизировав трудоёмкий процесс наземного сбора данных. В ФГБУ «НИЦ "Планета"» разработан алгоритм, позволяющий строить карты оценки состояния посевов зерновых культур по трём градациям, принятым в агрометеорологии: хорошее состояние посевов, удовлетворительное и плохое.

Ключевые слова: информационные технологии, зерновые культуры, оценка состояния посевов, спутник TERRA, спутник AQUA, данные прибора MODIS.

ASSESSMENT OF GRAIN CROPS BASED ON REMOTE SENSING DATA

Eugene I. Saprykin
Siberian Center FGBU «SRC "Planeta"», 630099, Russia, Novosibirsk, Sovetskaya st., 30, Junior Researcher; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Master student of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (913)204-33-39, e-mail: eugen_s_2003@mail.ru

Lyubov A. Sladkikh
Siberian Center FGBU «SRC "Planeta"», 630099, Russia, Novosibirsk, Sovetskaya st., 30, Leading Specialist, tel. (383)222-33-07, e-mail: sla@rcpod.siberia.net

Ekaterina N. Kulik
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associate Professor of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Methods of remote sensing (RS) can simplify the task of crops' monitoring during the growing season, may replace or optimize the laborious process of field data collection. Algorithm, developed in FGBU «SRC "Planeta"», allows to collect the maps of grain crops' assessment in agrometeorological gradation scale: a good state of cultivation, fair or poor.

Key words: information technology, crops, crops' condition assessment, satellite TERRA, satellite AQUA, MODIS data.

Полноценный мониторинг сельскохозяйственных культур с целью оценки состояния растительности и прогнозирования урожайности требует регулярного сбора больших объёмов данных. Объективные данные о состоянии сельскохозяйственных культур на больших территориях можно получить с помощью средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. В то же время для установления связей между характеристиками космических снимков и фактическим состоянием растительности необходимо провести контрольные измерения биометрических характеристик на полях тестовых хозяйств.

Благодаря устойчивому функционированию таких космических аппаратов (КА), как Terra/Aqua, Spot и Landsat появилась возможность использования многолетних рядов данных регулярных измерений. Количественной характеристикой состояния посевов служит нормализованный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Получить необходимые многозональные данные можно с КА Terra/Aqua, снимки оперативно принимаются и обрабатываются в Сибирском центре «НИЦ «Планета» 2 - 3 раза в сутки. Получение производных изображений на основе многозональных спутниковых данных путем обработки специальными алгоритмами позволяет оценивать состояние биомассы, продуктивность растений и осуществлять мониторинг состояния посевов.

Большой ряд данных статистической фактической урожайности зерновых культур в тестовых хозяйствах (2001-2011гг.) и накопленная база данных измерений NDVI за такой же ряд лет позволили найти и формализовать связи между данными ДЗЗ и фактическим состоянием растительности на рассматриваемой территории. На основе этой связи был создан алгоритм построение карт оценки состояния посевов зерновых культур по трем градациям, принятым в агрометеорологии: хорошее, удовлетворительное и плохое состояние посевов; для четырёх административных единиц Западно-Сибирского региона: Новосибирской, Омской, Кемеровской областей и Алтайского края.

Первые три этапа методики реализованы в виде программных модулей на языке IDL (Interactive Data Language) и используют функционал программного комплекса ENVI (Exelis VIS, США) и MODIS conversion tool kit (MCTK). Они заключаются в обработке информации низкого разрешения, полученной со спектрорадиометра MODIS, установленного на КА Terra/Aqua.

На первом этапе технологии построения карты состояния посевов используются композиты MOD09_GQ и MOD09_GA - результаты предобработанных данных прибора MODIS с КА Terra/Aqua. Из них можно получить значения отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном спектральных каналах, необходимых для расчёта индекса растительности NDVI, а также на их основе построить маску облачности. Далее производное изображение NDVI совмещается с маской облачности. Пример фрагмента получаемого изображения представлен на рис. 1.

Данные с КА Terra/Aqua отлично подходят для задач мониторинга, так как ежедневно обновляются. Специальный программный модуль собирает и заносит в базу данных, под управлением СУБД PostgreSQL 9.1, численные значения NDVI с более чем 8000 точек, являющихся центроидами рабочих участков на отдельно взятых полях тестовых хозяйств. Специалист может получить оперативный доступ к процессу через специально разработанный удобный web-интерфейс (рис. 2).

На втором этапе на растровое изображение накладывается маска неиспользуемых земель, выполняется классификация участков снимка, незакрытых масками. Маски неиспользуемых земель строились на основе снимков высокого разрешения с КА Spot и Landsat. Фрагмент маски изображён на рис. 3.

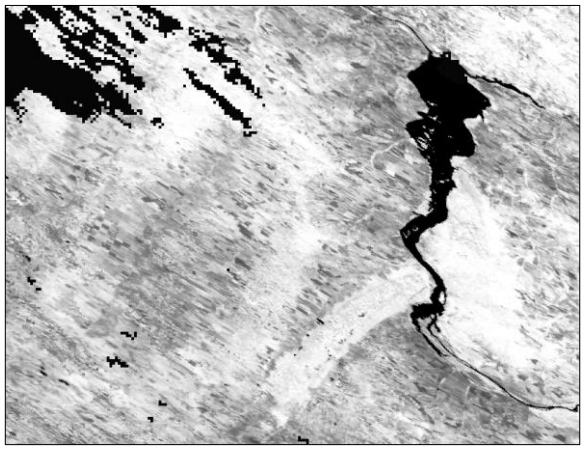
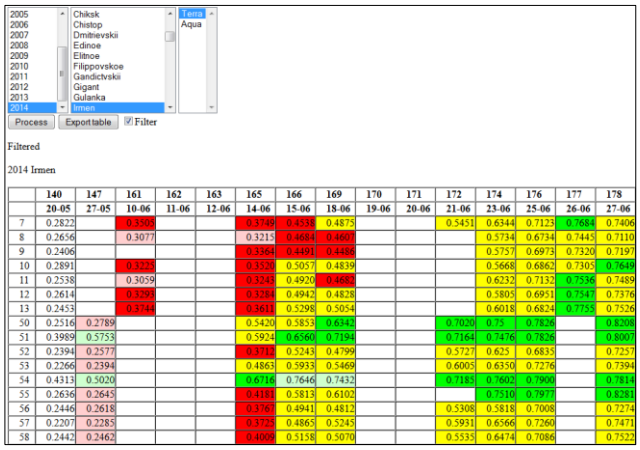


Рис. 1. Пример производного изображения индекса NDVI



	140	147	161	162	163	165	166	169	170	171	172	174	176	177	178
	20-05	27-05	10-06	11-06	12-06	14-06	15-06	18-06	19-06	20-06	21-06	23-06	25-06	26-06	27-06
7	0.2822		0.3502			0.3749	0.4538	0.4875			0.5451	0.6344	0.7123	0.7684	0.7406
8	0.2656		0.3077			0.3215	0.4684	0.4607				0.5734	0.6734	0.7445	0.7110
9	0.2406					0.3364	0.4491	0.4486				0.5757	0.6973	0.7320	0.7197
10	0.2891		0.3222			0.3520	0.5057	0.4839				0.5668	0.6862	0.7305	0.7649
11	0.2538		0.3059			0.3243	0.4920	0.4682				0.6232	0.7132	0.7536	0.7489
12	0.2614		0.3292			0.3284	0.4942	0.4828				0.5805	0.6951	0.7547	0.7376
13	0.2453		0.3746			0.3611	0.5298	0.5054				0.6018	0.6824	0.7755	0.7526
50	0.2516	0.2789				0.5420	0.5853	0.6342			0.7020	0.75	0.7826		0.8208
51	0.3989	0.5753				0.5924	0.6560	0.7194			0.7164	0.7476	0.7826		0.8007
52	0.2394	0.2577				0.3311	0.5243	0.4799			0.5727	0.625	0.6835		0.7257
53	0.2266	0.2394				0.4863	0.5933	0.5469			0.6005	0.6350	0.7276		0.7394
54	0.4313	0.5020				0.6716	0.7646	0.7432			0.7183	0.7602	0.7900		0.7814
55	0.2636	0.2645				0.4181	0.5813	0.6102				0.7510	0.7977		0.8241
56	0.2446	0.2618				0.3767	0.4941	0.4812			0.5308	0.5818	0.7008		0.7274
57	0.2207	0.2285				0.3775	0.4865	0.5245			0.5931	0.6566	0.7260		0.7471
58	0.2442	0.2462				0.4099	0.5158	0.5070			0.5535	0.6474	0.7086		0.7522

Рис. 2. Интерфейс программного модуля автоматического сбора значений NDVI

Каждый пиксель полученной растровой тематической карты окрашивается в красный, жёлтый или зелёный цвет в зависимости от значения NDVI и даты, в которую был получен снимок. Это правило можно увидеть на рис. 4. Красный цвет пикселя соответствует плохому состоянию, жёлтый - удовлетворительному, зелёный - хорошему состоянию растительности.

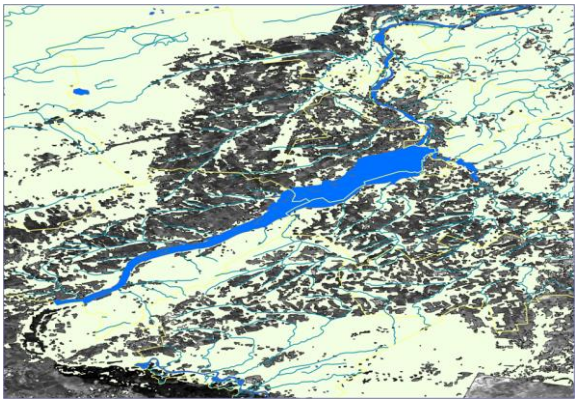


Рис. 3. Снимок с масками облачности и неиспользуемых земель

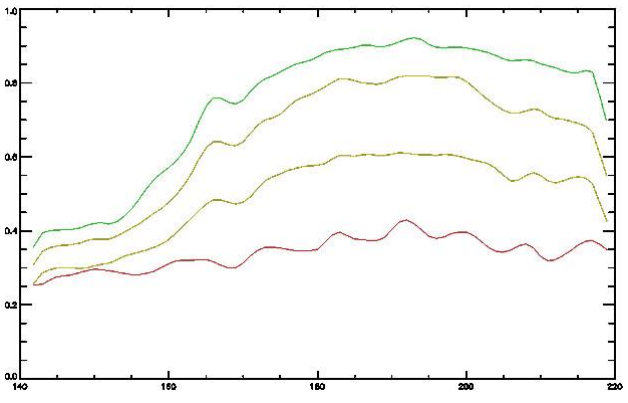


Рис. 4. Распределение значений индекса NDVI для трех классов посевов

Для выявления общих тенденций изменения индекса вегетации проведены исследования динамики значений NDVI на протяжении всего вегетационного периода по данным нескольких тестовых хозяйств, изначально разделенных на три категории: с хорошим, удовлетворительным и плохим земледелием.

В частности, было замечено, что чем выше продуктивность зерновых культур в хозяйстве, тем больше диапазон изменений значений NDVI на рабочих участках за вегетационный период (выше значение разницы между минимумом и максимумом), этот факт послужил критерием распределения хозяйств на три категории. По этому критерию можно классифицировать все тестовые хозяйства и определить пороговые значения категорий для оперативной классификации состояния посевов по всему региону.

1) На основе архива MOD09 и данных о месте положения рабочих участков, составим множество сборов данных:

$$T = \{(ndvi, id, doy, year)\}, \quad (1)$$

где T- множество сборов данных,

ndvi - полученное значение индекса вегетации в точке,

id - идентификатор рабочего участка на котором был произведён сбор,

doy - порядковый номер дня в году, когда был произведён сбор,

year - год когда был произведён сбор.

2) Определим *S(id, year)* подмножество *T* следующим образом:

$S(id, year) \subset T$,

$$S(id, year) = \{s \in T | s.id = id; s.year = year\}, \quad (2)$$

где $S(id, year)$ - множество сборов с одного рабочего участка за один вегетационный период,

s - некий элемент из множества сборов T,

s.id - идентификатор рабочего участка, где был произведён сбор,

s.year - год, когда был произведён сбор.

3) Зададим функцию *dif*, определяющую разницу между максимальным и минимальным значениями индекса вегетации на одном рабочем участке за вегетационный период:

$$dif(id, year) = max(S(id, year).ndvi) - min(S(id, year).ndvi), \quad (3)$$

где $dif(id, year)$ – функция, результатом которой является разница между минимальным и максимальным значением *ndvi* на рабочем участке с индексом *id* за год *year*,

$max(S(id, year).ndvi)$ – максимальное значение *ndvi* на рабочем участке с индексом *id* за год *year*,

$min(S(id, year).ndvi)$ - минимальное значение *ndvi* на рабочем участке с индексом *id* за год *year*.

4) Строим три множества характерных значений NDVI за вегетационный период:

$$F_b(year) = \{s \in T | s.year = year; dif(s.id, year) \in Bad\}, \quad (4а)$$
$$F_n(year) = \{s \in T | s.year = year; dif(s.id, year) \in Normal\}, \quad (4б)$$
$$F_g(year) = \{t \in T | t.year = year; dif(t.id, year) \in Good\}, \quad (4в)$$

где $\left.\begin{matrix} Bad & = (0.07; 0.375) \\ Normal & = (0.375; 0.57) \\ Good & = (0.57; 0.875) \end{matrix}\right\}$ – эмпирически подобранные интервалы, позволяющие оценить состояние рабочего участка по окончании вегетационного периода,

$F_b(year)$ - множество сборов, за год *year*, отнесённых к плохому состоянию растительности,

$F_n(year)$ - множество сборов, за год *year*, отнесённых к удовлетворительному состоянию растительности,

$F_g(year)$ - множество сборов, за год *year*, отнесённых к хорошему состоянию растительности,

s - некий элемент из множества сборов T.

5) Множества характерных значений NDVI за все вегетационные периоды объединяются в одно множество для каждой категории земледелия:

$$\left.\begin{matrix} \mathcal{F}_b = \bigcup_{i=2001}^{2011} F_b(i) \\ \mathcal{F}_n = \bigcup_{i=2001}^{2011} F_n(i) \\ \mathcal{F}_g = \bigcup_{i=2001}^{2011} F_g(i) \end{matrix}\right\}, \quad (5)$$

где $\mathcal{F}_b$ - множество сборов, за все имеющиеся в архиве годы, отнесённых к *плохому* состоянию растительности,

$\mathcal{F}_n$ - множество сборов, за все имеющиеся в архиве годы, отнесённых к *удовлетворительному* состоянию растительности,

$\mathcal{F}_g$ - множество сборов, за все имеющиеся в архиве годы, отнесённых к *хорошему* состоянию растительности.

6) На основе трёх множеств характерных значений строятся граничные значения NDVI, по которым можно определить состояние посевов в любой день вегетационного периода, а не после его окончания.

На третьем этапе полученный растр перепроецируется в географическую проекцию (синусоидальная проекция, в которой изначально находятся снимки, сильно искажает истинную форму объектов), комбинируется с векторным слоем неиспользуемых земель, векторными масками рек и крупных водных объектов.

На заключительном этапе в ГИС ArcGIS 10.2 (ESRI, США) полученный растр совмещается с картой-основой, добавляются обозначения крупных населённых пунктов, легенда, рамка и другие элементы карты. Пример итоговой карты представлен на рис. 5.

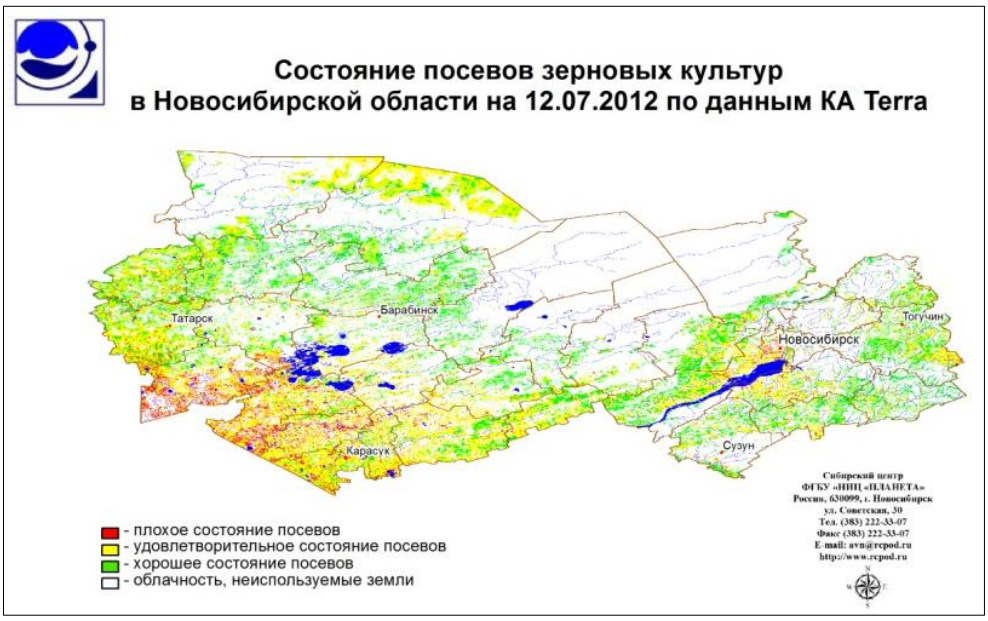


Рис. 5. Пример карты оценки состояния посевов зерновых культур, Новосибирская область, 12.07.2012 г.

Карта демонстрирует результаты оценки состояния посевов зерновых культур Новосибирской области на 12 июля 2012 года, представлено процентное соотношение каждой градации оценки: хорошее состояние 40%, удовлетворительное 51%, плохое состояние посевов 9%. Аналогичные карты формируются для Алтайского края, Кемеровской и Омской областей на все даты спутниковых съемок по не экранированным облачностью снимкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сладких Л. А., Кулик Е. Н., Сахарова Е. Ю. Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы международной науч. конф. / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. за вып. А. В. Машукова - Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2014. - С. 329-333.

2. Кулик Е. Н. Оперативный космический мониторинг: вчера, сегодня, завтра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды,

геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 134–139.

3. Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Захватов М. Г. Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 67–72.

4. Антонов В. Н., Затягалова В. В., Захватов М. Г., Пяткин Ф. В. Геопортал как точка входа в инфраструктуру пространственных данных Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 86–89.

5. Якутин М. В., Андриевский В. С. Почвенно-биологические методы в мониторинге агроэкосистем в лесостепной зоне Новосибирской области // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 48–53.

6. Антонов В. Н., Захватов М. Г., Пяткин Ф. В. Геопортал: информационное обеспечение прикладных дистанционных исследований // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 182–187.

7. Трубина Л. К., Муллаярова П. И., Баранова Е. И., Николаева О. Н. Некоторые подходы к геоинформационному картографированию зеленых насаждений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 68–74.

8. Ларионов Ю. С. Биоземледелие как новая парадигма экологически безопасного сельскохозяйственного производства // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 151–157.

9. Гиниятов И. А., Ильиных А. Л. Геоинформационное обеспечение мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 1 (14). – С. 37–44.

10. Ларионов Ю. С. Альтернативные подходы к современному земледелию и наращиванию плодородия почв (новая парадигма) // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 1 (21). – С. 49–61.

© Е. И. Сапрыкин, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик, 2015

УДК 528.88

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА ВЕГЕТАЦИИ

Елена Юрьевна Сахарова
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, младший научный сотрудник; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)222-33-07, e-mail: elena.saharova27@gmail.com

Любовь Александровна Сладких
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, ведущий специалист, тел. (383)222-33-07, e-mail: sla@rcpod.siberia.net

Екатерина Николаевна Кулик
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

В связи с изменениями, происходящими в системе землепользования, актуальным вопросом является контроль использования земель сельскохозяйственного назначения. Получение достоверной информации о состоянии сельскохозяйственных земель на обширных территориях стало возможным благодаря использованию дистанционных методов наблюдений. В статье представлены результаты выполненных Сибирским центром ФГБУ «НИЦ "Планета"» работ по оценке состояния посевов зерновых культур с использованием спутниковых данных.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг состояния сельскохозяйственных культур, вегетационный индекс.

SATELLITE MONITORING OF GRAIN CROPS ON BASIS OF VEGETATION INDEX' USE

Elena Yu. Sakharova
Siberian Center FGBU «SRC "Planeta"», 630099, Russia, Novosibirsk, 30 Sovetskaya St., Junior Researcher; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Post-graduate student of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (383)222-33-07, e-mail: elena.saharova27@gmail.com

Lyubov A. Sladkikh
Siberian Center FGBU «SRC "Planeta"», 630099, Russia, Novosibirsk, 30 Sovetskaya St., Leading Specialist, tel. (383)222-33-07, e-mail: sla@rcpod.siberia.net

Ekaterina N. Kulik
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associate Professor of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

The control of agricultural lands' use is a topical issue due to the changes in the land management system. The obtaining of reliable information for the vast territories about the agricultural

lands' state is possible through the use of observation methods are based on remote sensing. The article presents the results of completed experiments of satellite data use for grain crops' assessment at Siberian Center FGBU «SRC" Planet"».

Key words: remote sensing, monitoring of the agricultural crop conditions, vegetation index.

В течение последних десятилетий в России наблюдаются серьёзные изменения в системе землепользования, которые находят отражение и в смене структуры использования пахотных земель. Выводятся из оборота большие площади земель, ранее используемые под сельскохозяйственные нужды, что приводит к снижению плодородия почв и деградации земель, с последующим зарастанием этих полей, в том числе и древовидной растительностью. Использование спутниковых данных позволяет с наименьшими затратами выполнять мониторинг изменений состояния растительного покрова на огромных территориях и на основании этого давать объективную оценку использования пахотных земель.

Использование спутниковой информации для целей сельского хозяйства началось в Сибирском центре ФГБУ «НИЦ «Планета» (СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета») в 2005 году с расчётов прогноза урожайности яровой пшеницы, что послужило отправной точкой для проведения дальнейших исследований. На начальном этапе работ при выборе тестовых хозяйств были отобраны хозяйства с разным уровнем земледелия в соответствии с агроклиматическим районированием. Большой ряд данных фактической урожайности зерновых культур в тестовых хозяйствах за период с 2001 по 2011 гг. и накопленная база данных измерений индекса вегетации (NDVI) за этот же период, позволили создать алгоритм оценки состояния посевов зерновых культур по трем градациям, принятым в агрометеорологии: хорошее, удовлетворительное, плохое состояние посевов [1]. Для реализации работы представленного алгоритма используется информация с космических аппаратов (КА) Landsat и Terra [2]. С 2012 года выполняются наблюдения за состоянием посевов зерновых культур на юге Западной Сибири (Новосибирская, Омская, Кемеровская области и Алтайский край). Результатом работы данного алгоритма служат карты оценки состояния посевов юга Западной Сибири, позволяющие оперативно получать процентное соотношение каждой из трех градаций с момента появления всходов на полях и до окончания вегетационного периода. [3]

На исследуемых территориях высок процент земель, которые не используются под сельскохозяйственные посевы, поэтому для оптимизации количества вычислений при обработке необходимо исключить из расчетов площади неиспользуемых земель. В данном случае к неиспользуемым землям относятся: лесные массивы, пастбищные луга и сенокосные угодья, населённые пункты, элементы гидрографии и т.д. В результате, для каждого района была подготовлена своя маска неиспользуемых земель, созданная на основе обработки информации с КА Landsat с использованием программных комплексов ENVI и ArcGIS.

Маски неиспользуемых земель служат составной частью работы алгоритма оценки состояния посевов, и на первоначальном этапе их создания был произведен подбор безоблачных сцен с КА Landsat на исследуемую территорию. По

каждому спутниковому изображению была выполнена классификация с обучением для выделения не пахотных земель с последующим объединением полученных результатов в единый слой. Для исключения погрешностей классификации, возникших из-за неоднородности сельскохозяйственных полей, каждая маска была отредактирована в ручном режиме. На рис. 1 представлена маска неиспользуемых земель, построенная на территорию Алтайского края.

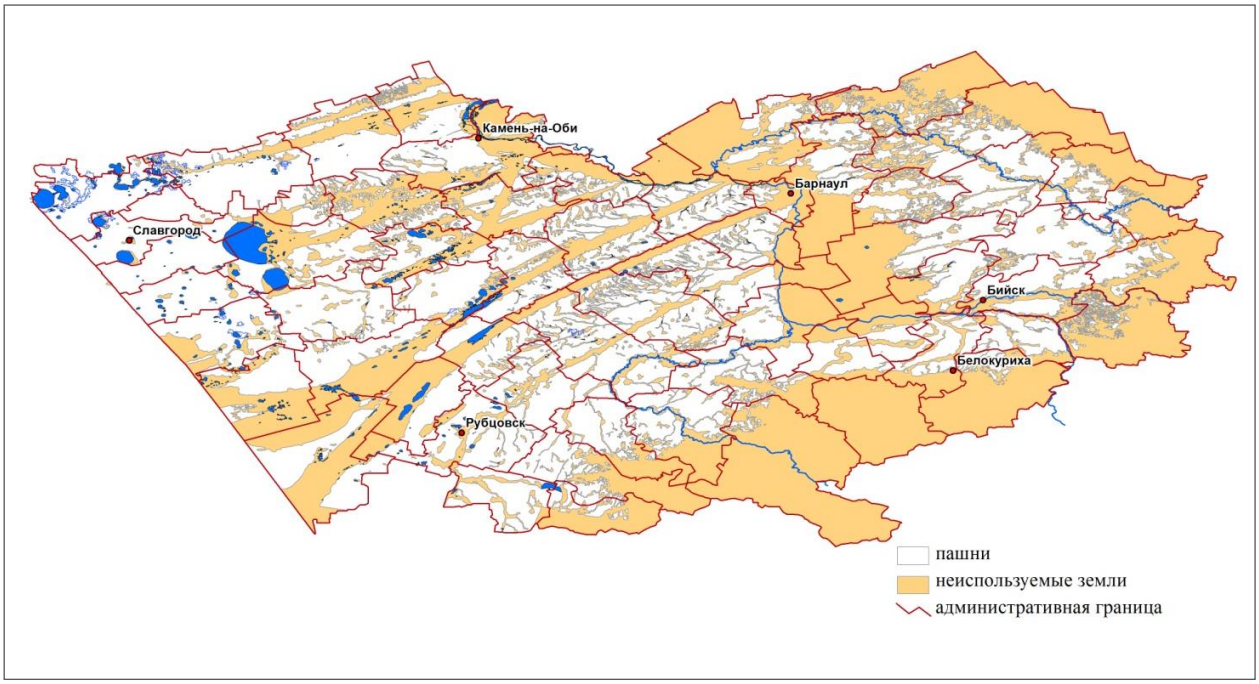


Рис. 1. Маска неиспользуемых земель на территорию Алтайского края

Работа алгоритма построена на использовании индекса вегетации. Анализ общих закономерностей развития зерновых культур в течение всего вегетационного периода послужил основой для получения пороговых значений NDVI. На каждую безоблачную дату по изображению с КА Terra рассчитывают NDVI, полученное индексное изображение совмещают с маской облачности и маской неиспользуемых земель. Для неисключенных масками пахотных земель значения NDVI делятся на три градации, в соответствии с рассчитанными ранее пороговыми значениями: хорошее состояние посевов, удовлетворительное и плохое. После этого на полученное изображение проецируются элементы гидрографии, административные границы и населённые пункты, формируется легенда карты и выполняется оформление конечного продукта.

Для проверки правильности работы алгоритма результаты оценки состояния посевов, полученные с помощью дистанционных методов, сравнивались с данными наземных агрометеорологических маршрутных обследований, проводимых на территории Новосибирской и Кемеровской областей, а также на территории Алтайского края. Так в 2014 году в период с 14 по 27 июля агрометеорологами гидрометеостанций совместно с работниками сельского хозяйства были проведены маршрутные обследования посевов в 22 районах Новосибирской области на 153 полях. Аналогичные обследования были проведены и на

территории Алтайского края в период с 7 по 26 июля в 32 районах на 397 полях. Стоит отметить, что на территории Кемеровской области наземные обследования проводят только в годы с экстремальными погодными условиями, поэтому наличие дистанционных методов ежегодного получения информации является особенно актуальным в подобных ситуациях. В табл. 1 приведены результаты оценки состояния посевов на территории Новосибирской области, полученной с использованием дистанционных и наземных методов.

Таблица 1

Результаты проведения наземных агрометеорологических маршрутных обследований и дистанционных методов оценки состояния посевов

Градации оценки состояния посевов	Наземные агрометеорологические маршрутные обследования		Результаты обработки спутниковых данных	
	Дата наземн. обслед.	% соотн. град.	Дата спутниковых измерений	% соотн. град.
	2012 г.			
Хорошее	6 - 20 июля	26	17 июля	24
Удовлетворительное		57		54
Плохое		17		22
	2013 г.			
Хорошее	21 июля - 01 августа	75	21 июля	69
Удовлетворительное		24		28
Плохое		1		3
	2014 г.			
Хорошее	14 - 27 июля	56	11 июля	30
Удовлетворительное		37		65
Плохое		11		5

В среднем, разница между значениями наземных и дистанционных методов оценки состояния посевов зерновых культур за три года проведения наблюдений составила:

– по Новосибирской области – 9%;
– по Алтайскому краю – 13%;
– по Кемеровской области – 8%.

За период проведения оперативных работ в 2014 году было подготовлено пять карт оценок для территории Новосибирской области (рис. 2), по четыре карты для Кемеровской области и Алтайского края, а также две карты на Омскую область.

Алгоритм позволяет отслеживать изменения состояния посевов, происходящих как на территории областей и края, так и давать более детальную оценку по хозяйствам. Выполнение оценки состояния посевов с детализацией до поля стало возможным благодаря использованию автоматических измерений индекса вегетации в реперных точках, созданных специально для каждого отдельного хозяйства. В табл. 2 приведён фрагмент полученных по спутниковым данным измерений индекса NDVI, а результат их обработки представлен на рис. 3.

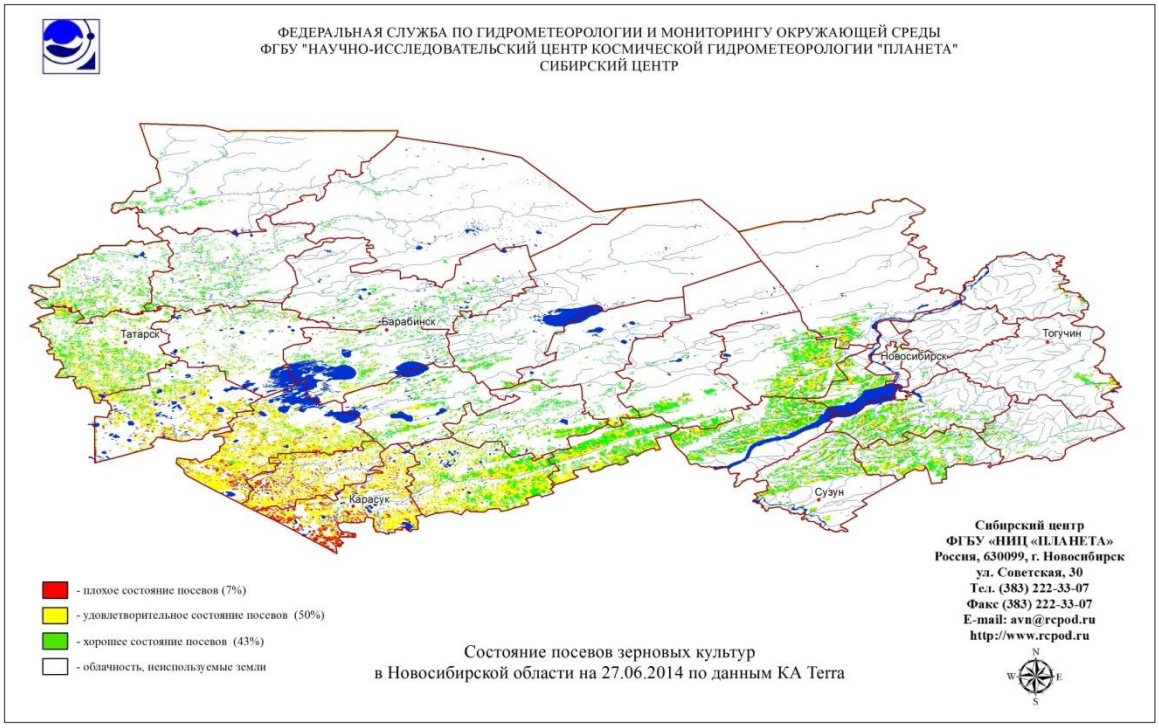


Рис. 2. Карта оценки состояния посевов зерновых культур, Новосибирская область, 27 июня 2014 г.

Таблица 2

Измерение индекса вегетации на полях хозяйства ФГУП «Кремлёвское», 08.07.2014 г.

№ точки	Значение NDVI	№ точки	Значение NDVI	№ точки	Значение NDVI
1	0.8070	36	0.7364	47	0.8032
2	0.8417	37	0.7878	48	0.7783
3	0.7740	38	0.7373	49	0.8070
4	0.7739	39	0.7264	50	0.8054
5	0.7833	40	0.7328	51	0.8299
6	0.8229	41	0.7390	52	0.8360

Разработанный алгоритм имеет высокую эффективность за счёт автоматизации измерений значений вегетационных индексов по реперным точкам, автоматизации расчетов пороговых значений на основе анализа многолетних наблюдений. Также в работе алгоритма используются уникальные маски неиспользуемых земель, периодически обновляемые по актуальным снимкам, объективно отражающим реальную ситуацию. Алгоритм оценки состояния посевов зерновых культур, основанный на использовании спутниковых данных, позволяет реализовать оперативный мониторинг состояния посевов, как на региональном уровне, так и на уровне отдельных полей. Накопленная информация оценки состояния посевов позволяет осуществлять временной и пространственный анализ динамики развития сельскохозяйственных культур. Полученные карты оценки состояния посевов в оперативном режиме передаются в отделы агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», а

также размещаются на официальном сайте СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» в разделе «Мониторинг состояния посевов».

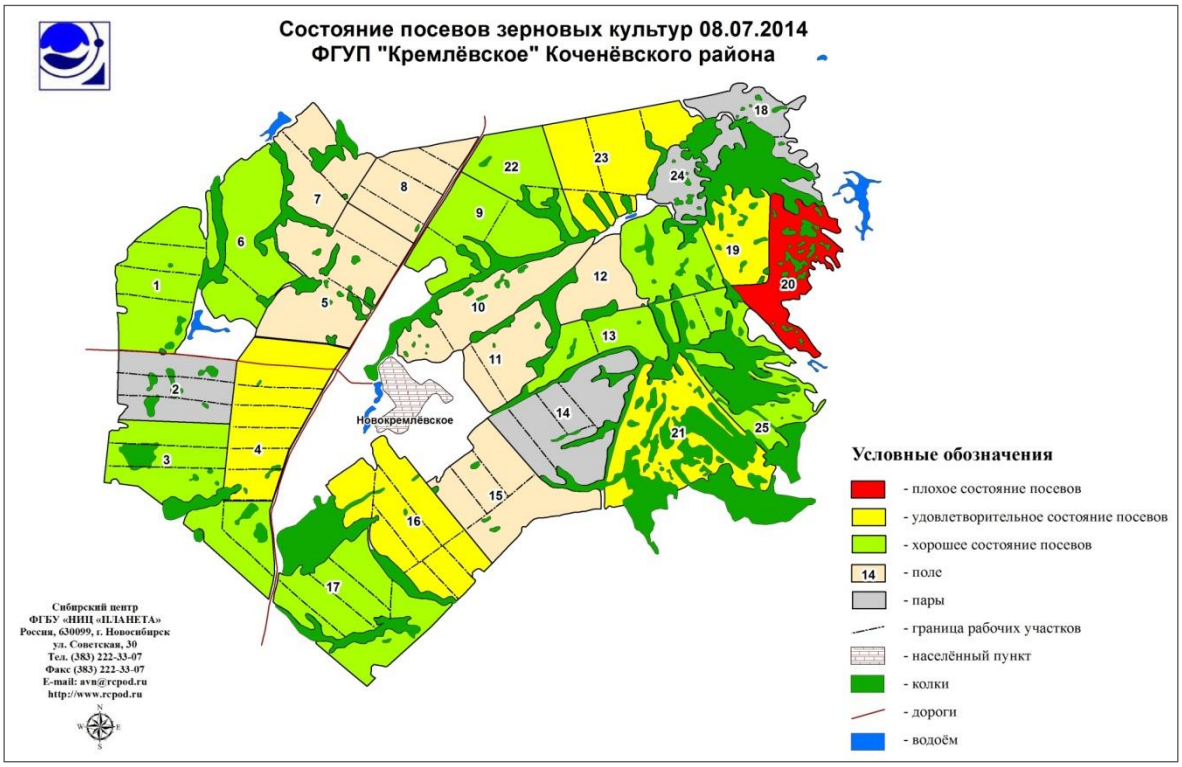


Рис. 3. Карта оценки состояния посевов зерновых культур,
ФГУП «Кремлёвское», 8 июля 2014 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Захватов М. Г. Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 67–72.

2. Кулик Е. Н. Оперативный космический мониторинг: вчера, сегодня, завтра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 134–139.

3. Сладких Л. А., Кулик Е. Н., Сахарова Е. Ю. Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы международной науч. конф. / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. за вып. А. В. Машукова - Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2014. – С. 329–333.

© Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик, 2015

УДК 528.88

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ПРИБОРА MODIS ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАВОДКОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА ПРИМЕРЕ ПАВОДКА НА РЕКЕ ЧУЛЫМ ВЕСНОЙ 2014 ГОДА

Михаил Павлович Шагаев
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, ведущий электроник отдела НИР; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)935-26-99, e-mail: shagaev@rcpod.ru

Екатерина Николаевна Кулик
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

В статье рассмотрены возможности применения методов дистанционного зондирования Земли при мониторинге паводковой обстановки. Приведены результаты проведенных экспериментов в Сибирском центре ФГБУ «НИЦ "Планета"» на примере паводка на реке Чулым Новосибирской области в 2014 году.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, мониторинг паводковой обстановки, данные прибора MODIS.

ASSESSMENT OF POTENTIALS OF MODIS DATA' USE FOR FLOOD MONITORING ON THE EXAMPLE OF CHULYM RIVER FLOOD, SPRING 2014

Mikhail P. Shagaev
Siberian Center FGBU «SRC "Planeta"», 630099, Russia, Novosibirsk, 30 Sovetskaya St., Leading Electronic Engineer of R&D Department; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Master student of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (913)935-26-99, e-mail: shagaev@rcpod.ru

Ekaterina N. Kulik
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associate Professor of Physical Geodesy and Remote Sensing Department, tel. (913)926-82-57, e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

The possibilities of the remote sensing application in flood monitoring are discussed. The results of the experiments in the Siberian center FGBU "SRC "Planet" are presented. Area of interest was the flood on Chulym river, Novosibirsk region, spring 2014.

Key words: remote sensing, flood monitoring, MODIS data.

Паводки и наводнения это стихийные бедствия, охватывающие большие территории и превосходящие по наносимому ущербу все другие чрезвычайные ситуации. Наиболее эффективным методом слежения за паводком может служить космический мониторинг с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). В ФГБУ «НИЦ «Планета» регулярно проводится мо-

ниторинг паводков. Для выявления затопленных территорий используются данные с таких космических аппаратов (КА) как Ресурс-П и Landsat-8, так как они имеют высокое пространственное разрешение. Такие спутники дают снимки, содержащие исчерпывающую информацию о поводке на момент съемки. Однако, интервалы между съёмками территории наводнения этими КА могут быть крайне велики. Для решения проблемы своевременного обновления можно использовать данные со спутников, производящих ежедневное зондирование земной поверхности.

Цель эксперимента состояла в демонстрации технологических возможностей методики мониторинга паводка, а также оценке потенциала использования информации с КА TERRA и AQUA на примере наводнения на реке Чулым в апреле 2014 года.

Рис. 1. Летний снимок местности из архива GoogleMaps с выделенным

В начале апреля 2014 года на реке Чулым вблизи районного центра г. Чулым начался паводок. Для мониторинга затопленных территорий использовались данные со спутников Ресурс-П и Landsat-8 с пространственным разрешением до 15 метров каждый, а также данные GoogleMaps. Для определения областей подтопления было необходимо выделить положение поймы реки. Для этого был использован летний снимок местности из архива GoogleMaps (рис. 1).

Данные со спутника Ресурс-П за 16 апреля 2014г. были основным источником информации о паводковой обстановке во время подъема воды. Для определения кромки воды была проведена классификация изображения по методу IsoData. После выделения классов, соответствующих территориям подтопления, была получена карта подтопления (рис. 2).

Следующим изображением высокого разрешения интересующей нас территории был снимок со спутника Landsat-8 от 12 мая 2014 г. После атмосферной коррекции снимок был приведён к разрешению 15 метров с помощью метода Pan Sharpening. Далее была проведена классификация с целью выделения областей подтопления. Ниже приведен снимок с наложенным на него векторным слоем зон подтопления. По этому изображению можно оценить, насколько площадь водной поверхности уменьшилась за 25 дней (рис. 3).

Основываясь на полученных результатах, в среде ArcGIS была проведена оценка площади водной поверхности разлившейся реки на моменты 16 апреля и 12 мая 2014г. Были рассчитаны площадь поймы и площади затопления на эти даты. В пределах области интереса площадь паводка составила: 16 апреля ~2.54 км^2; 12 мая~0.42 км^2; площадь поймы ~0,24 км^2.

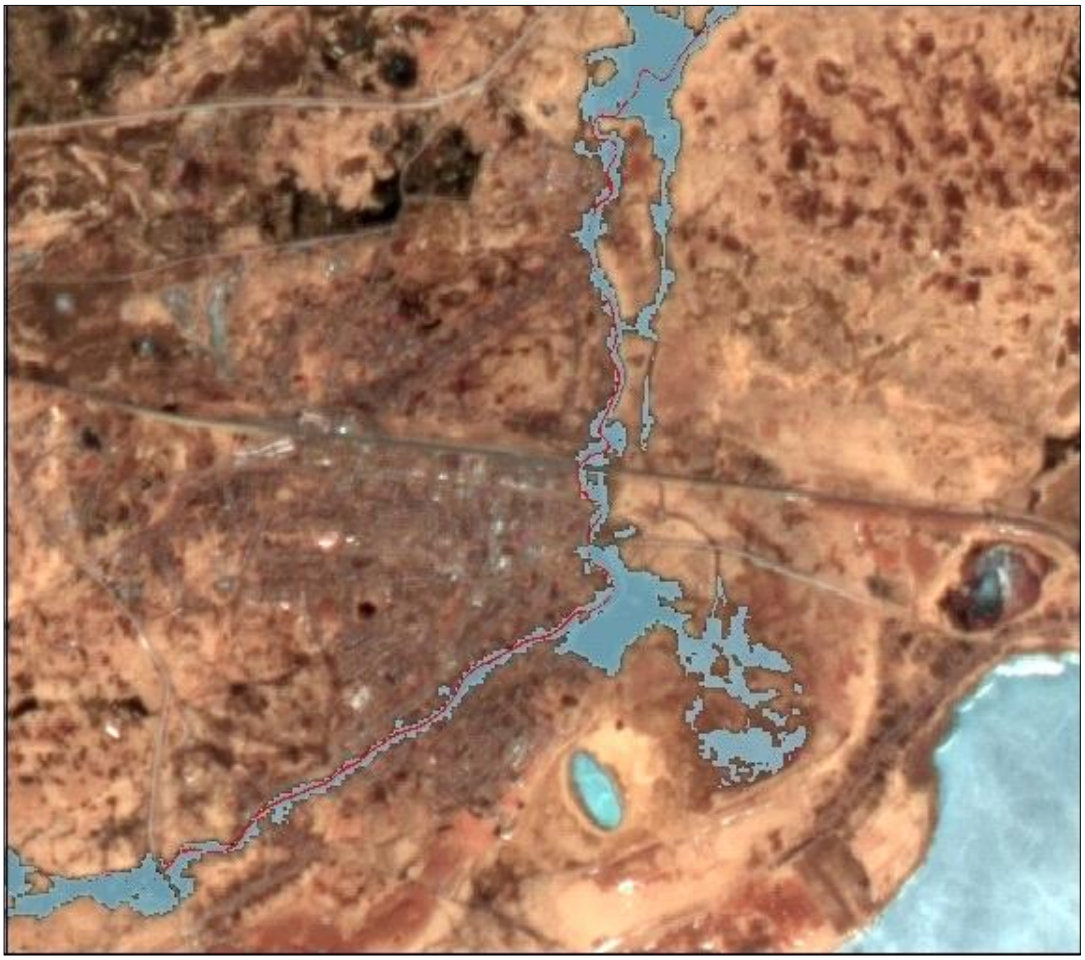


Рис. 2. Результат обработки снимка Ресурс-П за 16 апреля 2014 г.
Красным выделена пойма реки, синим - область затопления

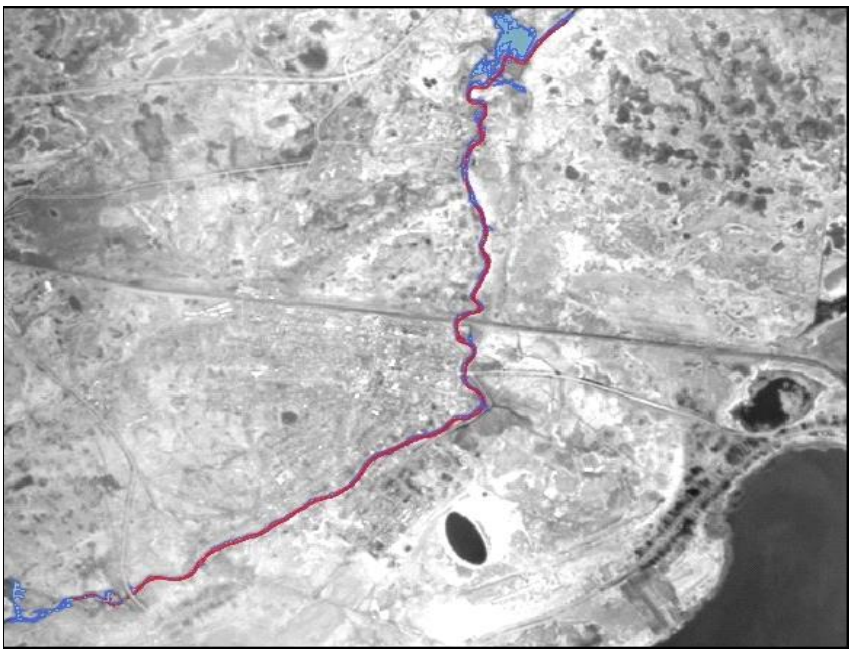


Рис. 3. Снимок со спутника Landsat-8 от 12 мая 2014 г.
Красным выделена пойма реки, синим - область затопления

При мониторинге паводковой обстановки важным фактором является своевременность полученных данных. Становится очевидной необходимость использования данных со спутников, производящих ежедневное зондирование интересующих участков земной поверхности, таких как TERRA и AQUA. С учетом облачности интервал между съемками для таких КА составляет в среднем 4-5 дней. Необходимо учитывать особенность использования таких данных, поскольку съемочное оборудование этих КА позволяет получать снимки низкого пространственного разрешения. В нашей работе мы использовали данные прибора MODIS этих спутников, имеющие пространственное разрешение 250 метров.

Для визуальной оценки информативности данных на снимки MODIS от 16 апреля 2014г. наложен контур областей затопления, полученный после обработки снимка КА Ресурс-П на аналогичную дату (рис. 4).

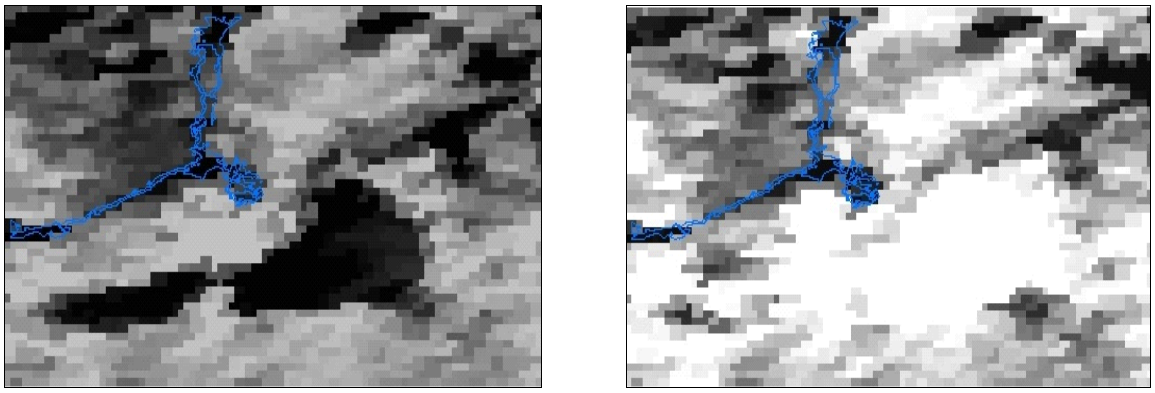


Рис. 4. Снимок MODIS со спутника Aqua:
красный и инфракрасный спектральные каналы

Итоговый контур наводнения, который удалось выявить классификацией снимков MODIS, в общих чертах повторяет контур паводка, полученного на основе данных спутника Ресурс-П (рис. 5).

Для выделения областей подтопления и уточнения площади паводка, были рассчитаны значения индекса NDVI для территории паводка (рис. 6).

Поскольку по снимкам MODIS нельзя выделить контуры затопления с высокой точностью, следовательно, нет возможности с приемлемой точностью рассчитать площади затопления по контурам. Таким образом, встаёт вопрос оценки доли площади, занятой водой, внутри одного пикселя. Сложность этой задачи обуславливается тем, что нельзя просто сравнить отношения яркости пикселя в некотором спектре в разное время (до и во время наводнения), так как изменяется множество условий проведения съемки, таких как высота Солнца, угол съёмки и пр. Однако сравнение NDVI лишено этих недостатков.

Ниже приведено два решения для оценки доли пикселя, занятого водой: одно приближенное, второе более точное.

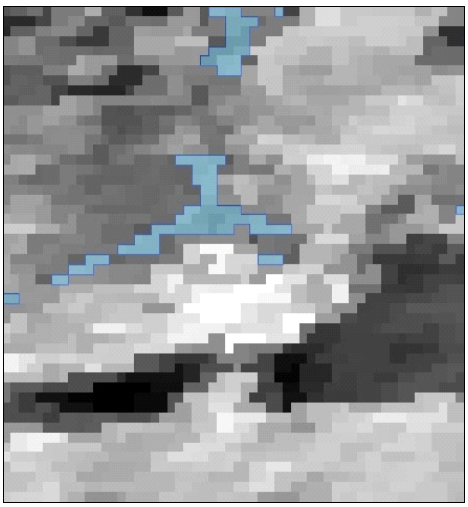


Рис. 5. Выделение водной поверхности на снимке MODIS

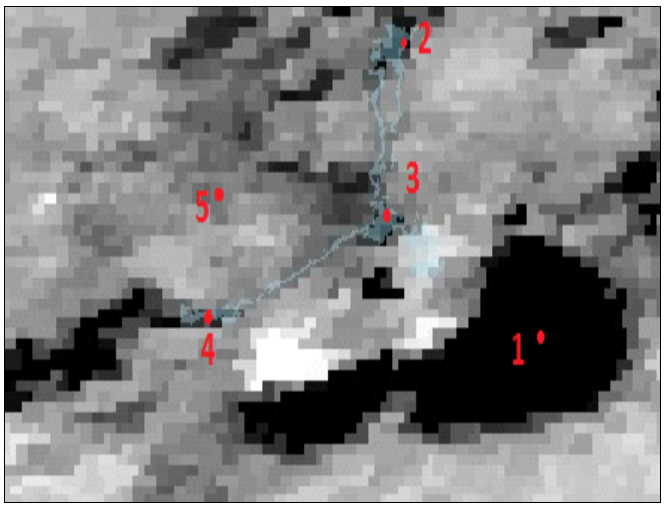


Рис. 6. NDVI по данным MODIS(Terra), 16 апреля 2014 г. Характерные значения NDVI для областей: 1 (озеро, лёд) – 0,10; 2 – 0,14; 3 – 0,2; 4 – 0,2; 5(посёлок) – 0,23

Приближенное решение:

$$s = 1 - \frac{(NDVI_1 * (1 + NDVI_0))}{NDVI_0 - NDVI_1}, \quad (1)$$

где $NDVI_0$ - значение индекса NDVI до наводнения,

$NDVI_1$ - значение индекса NDVI во время наводнения,

s - доля площади пикселя, занятого водой.

Точное решение:

$$s = \frac{(1-\beta)*(\alpha-\gamma)}{(1-\gamma)*(1-\beta-(1-\gamma)*k)}, \quad (2)$$

где α - значение индекса NDVI до наводнения,

γ - значение индекса NDVI во время наводнения,

β - значение индекса NDVIдля пикселя, полностью занятого водой,

k - отношение значений яркости водной поверхности в ближнем инфракрасном канале во время наводнения и до него,

s - доля площади пикселя, занятого водой.

На момент паводка 16 апреля 2014г. на снимке не было обнаружено открытых водных поверхностей достаточной площади для определения коэффициентов β и k, следовательно, не было возможности использовать точное решение. Таким образом, оценка площади паводка была проведена на основе приближенного решения.

Рассчитывая площадь подтопления по площади контура, классифицируемого как водная поверхность, получили площадь паводка равной 6 км^2, что более чем в 2 раза превышает реальную площадь паводка на данном участке реки в этот период. При учете поправки, площадь паводка была оценена в 4 км^2, что в 1,5 раза ближе к истине, по сравнению с предыдущим результатом.

Далее мы использовали продукт MCD43A4, который представляет собой 16-ти дневный композит снимков, составленный по данным TERRA и AQUA с помощью функции BRDF (двулучевая функция отражательной способности). Пространственное разрешение MCD43A4 составляет 500 метров. При разливах рек на более чем 250 метров этот продукт можно использовать для оценки площади наводнения. Но при паводках небольших масштабов использование продукта с таким разрешением для мониторинга состояния паводка не представляется возможным.

Вывод

Основной проблемой мониторинга половодий по ДДЗЗ можно назвать нехватку оперативных данных. Эта проблема связана с ограничениями частоты повторения спутниковой съемки конкретных затопляемых территорий и наличием облачности. Поэтому при наблюдениях половодий целесообразно использовать информацию со всех доступных космических систем. Вместе с тем, пространственное разрешение данных некоторых КА, таких, как TERRA и AQUA, не позволяет достоверно дешифрировать кромку воды и приводит к ошибкам в определении масштабов половодья. Таким образом, оперативный мониторинг паводков из космоса без использования наземных наблюдений в некоторых случаях малоэффективен. Для улучшения качества мониторинга необходимо использовать данные со стационарных гидропостов и, по возможности, организовывать временные (мобильные) посты гидрологических наблюдений в паводкоопасных районах. В перспективе, целесообразно провести моделирование зон затопления по космическим снимкам высокого пространственного разрешения в сочетании с данными об уровнях воды, определяемых на гидропостах. Такие модели способны обеспечить возможность более оперативно оценивать общую гидрологическую обстановку и динамику её развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авакян А. Б. Наводнения. Природные и атмосферные причины наводнений. Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2013. – № 1.
2. Кулик Е. Н. Оперативный космический мониторинг: вчера, сегодня, завтра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 134–139.
3. Никитин В. Н., Николаева З. В. Гидродинамический подход к определению зон подтопления при чрезвычайных ситуациях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 3–7.
4. Малыгин В. Н., Пивон Ю. И. Современные технологии защиты территорий от наводнений // СИББЕЗОПАСНОСТЬ-СПАССИБ-2014. Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения: сб. матер. Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 24–26 сентября 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 114–120.

5. Антонов В. Н., Захватов М. Г., Пяткин Ф. В. Геопортал: информационное обеспечение прикладных дистанционных исследований // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 182–187.

6. Антонов В. Н., Затягалова В. В., Захватов М. Г., Пяткин Ф. В. Геопортал как точка входа в инфраструктуру пространственных данных Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 86–89.

7. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Математическое моделирование климатического стока из бассейна реки Обь // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 131–137.

8. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Математическое моделирование стока из бассейна реки Лена // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 3–8.

9. Болотина Е. А., Дубровский А. В. Примеры разработки геоинформационного обеспечения для управления кризисными ситуациями на муниципальном уровне // СИББЕЗОПАСНОСТЬ-СПАССИБ-2014. Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения: сб. матер. Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 24–26 сентября 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 3–11.

© М. П. Шагаев, Е. Н. Кулик, 2015

УДК 621.383

ПРИМЕНЕНИЕ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ГЕОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ

Георгий Георгиевич Горбунов
ОАО «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова», 199053, Россия, Санкт-Петербург, Кадетская линия В. О., 5, корп. 2, доктор технических наук, научный руководитель отделения, тел. (812)269-24-94, e-mail: gggorbunov@mail.ru

Константин Никитич Чиков
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, тел. (812)232-14-01, e-mail: otzi@mail.ifmo.ru

Виктор Брунович Шлишевский
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Рассматриваются особенности построения и методологические возможности типичных видеоспектрометров для дистанционного зондирования с борта самолета и спутника. Эти приборы предназначены для эффективного решения геологических и экологических задач.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, самолетные и спутниковые видеоспектрометры, геологическая и экологическая интерпретация (снимков).

GEOLOGY AND ECOLOGY APPLICATIONS OF REMOTE SENSING IMAGING SPECTROMETER APPARATUS

George G. Gorbunov
Federal State Unitary Enterprise Scientific and Industrial Corporation «Vavilov State Optical Institute», 199034, Russia, St. Petersburg, 12 Birzhevaya line, Doctor of Technical Science, Research Head of Department, tel. (812)269-24-94, e-mail: gorbunov@mail.ru

Konstantin N. Tchikov
ITMO Universiti, 197101, Russia, St. Petersburg, 49 Kronverksky Ave., Associate professor, Associate professor of Department of Computer Systems Design and Security, tel. (812)305-89-47, e-mail: otzi@mail.ifmo.ru

Viktor B. Shlishevsky
Sibirian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Science, Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

The features of the construction and methodological capacities airborne and satellite typical imaging spectrometers for remote sensing are considered. These devices are intended for efficient decision of the multiple geological and ecological problems.

Key words: remote sensing, airborne and satellite imaging spectrometers, geologic and ecologic interpretation.

Современная тенденция к организации глобального спектрозонального мониторинга, направленного на обнаружение и изучение природных и антропогенных образований, базируется на приборном обеспечении, позволяющем оперативно решать задачи их поиска и ситуационного анализа на обширных территориях. Выполнению поставленных задач в полной мере отвечают спектральные дистанционные методы и средства, применение которых при исследовании естественных и искусственных объектов не искажает поля измеряемых характеристик, в частности, спектральных коэффициентов яркости (СКЯ), что повышает достоверность получаемой информации. В настоящее время одной из наиболее перспективных реализаций таких средств и методов считаются видеоспектрометры (imaging spectrometers) [1, 2]. Как правило, эти приборы устанавливаются на борту авиационных и космических носителей.

Классические спектральные приборы при аэро- и космических наблюдениях обычно регистрируют лишь усредненные по приборному полю зрения СКЯ земной поверхности, которые могут существенно отличаться от данных, полученных при измерениях на местности. Результаты же видеоспектрометрической съемки практически неотличимы от данных наземных измерений СКЯ не только для каждого малого объекта на местности, но и для его элементов или фрагментов, в том числе, находящихся на пределе пространственного разрешения. Иначе говоря, видеоспектрометры способны поэлементно опознавать тонкие тоновые оттенки смежных предельно близких по «цвету» объектов во многих (более 100) спектральных интервалах, сочетая при этом высокое пространственное и спектральное разрешение [3].

Схемной основой большинства видеоспектрометрической аппаратуры служит дисперсионный полихроматор, включающий входную щель, коллиматорный и камерный объективы, диспергирующий элемент и размещенный в выходной фокальной плоскости (плоскости спектра) матричный приемник излучения, ориентированный своими строками строго параллельно входной щели. В качестве диспергирующего элемента могут использоваться спектральные призмы или дифракционные решетки, что позволяет условно разделить подобные видеоспектрометры на призменные и дифракционные. В обоих типах приборов входной проецирующий объектив (аналог аэрофотообъектива) строит изображение исследуемой местности в неразложенном свете в плоскости входной щели полихроматора (см. рис.). Тогда на выходе полихроматора формируется континуум монохроматических изображений щели, представляющий собой многополосный спектральной кадр, каждая монохроматическая (или, точнее, квазимонохроматическая) полоса которого совпадает со строкой фотоприемника. Особенностью такой компоновки является статическое состояние всех конструктивных элементов, т. е. у работающего прибора отсутствует какое-либо механическое движение кинематических цепей и пар (оптико-механическое сканирование), что является существенным преимуществом аппаратуры данного класса по сравнению, например, с гиперспектральными сканерными системами [4].

Так как входная щель полихроматора посредством входного объектива оптически сопрягается с земной поверхностью, то ее длина определяет протяженность полосы обзора, а ширина – геометрическую и спектральную разрешающие способности видеоспектрометра на местности.

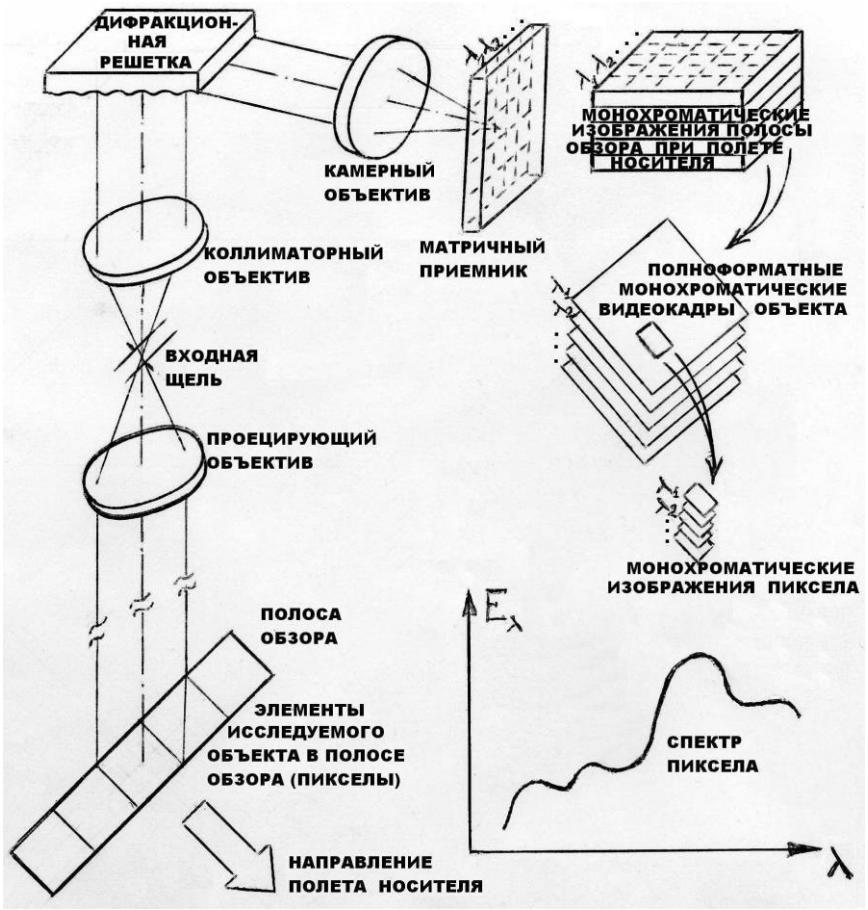


Рис. Принцип действия дифракционного видеоспектрометра

В процессе измерений проекция щели на местность, ортогональная направлению полета, перемещается шаг за шагом по земной поверхности, что приводит к обновлению изображений в монохроматических строках. Это позволяет сформировать в запоминающем устройстве, входящем в состав бортовой видеоспектрометрической аппаратуры, полноформатные монохроматические видеокадры для каждой отдельной рабочей длины волны из складываемых монохроматических строк (или, другими словами, из «одноцветных» строк, последовательно соединяемых «бок о бок»), согласно «пошаговому» движению носителя. Поскольку каждая отдельная строка фактически регистрирует детализируемое монохроматическое изображение узкой полосы земной поверхности, сопряженной с входной щелью полихроматора, то, сколько таких строк имеет фотоприемник, столько, в принципе, можно зарегистрировать монохроматических узкополосных изображений участка местности, над которой пролетает носитель.

В последнее время стали также интенсивно развиваться и применяться интерференционные видеоспектрометры, основанные на методе фурье-спектрометрии, позволяющем значительно расширить регистрируемый спектральный диапазон, улучшить пороговую чувствительность, а в некоторых случаях – упростить прибор и уменьшить его массогабаритные характеристики [5–8].

В полной мере позитивные свойства бортовой видеоспектрометрической аппаратуры, как нового эффективного инструмента познания, раскрываются при выполнении природно-ресурсных и экологических изысканий, когда требуется получить высококачественные монохроматические аэрокосмические изображения поверхности Земли [9], что способствует правильной постановке поисковых работ.

Так, одними из важных элементов структуры земной коры, выявляемых видеоспектрометрами со спутниковых и подспутниковых высот, являются разломы, по которым отдельные крупные блоки горных пород или целые горные массивы смещались в прошлые геологические эпохи друг относительно друга в вертикальном или горизонтальном направлениях. Разломы, разные как по характеру движения (сдвиги, сбросы, надвиги), так и по времени своего образования, а также по глубине проникновения в земную кору, хорошо выделяются и визуализируются в видеоспектральных изображениях даже в тех случаях, когда при наземных исследованиях обнаружение их затруднено. Особую ценность получаемой информации придает то обстоятельство, что многие разломы служили путями подъема с больших глубин горячих рудоносных вод, которые, приближаясь к поверхности и остывая, формировали, в частности, так называемые гидротермальные месторождения вольфрама, молибдена, ртути и некоторых других металлов. Нефть и газ легче воды, двигавшейся по разломам, и поэтому на глубине они чаще всего скапливаются в куполообразных или удлиненных (антиклинальных) поднятиях слоев, служащих коллекторами углеводородов. Такие куполовидные поднятия также легко обнаруживаются в аэрокосмических изображениях, получаемых с помощью видеоспектрометров. Зная, что месторождение попадает в зону разлома или конкретно – в зону куполовидного поднятия, отчетливо видимого в видеоспектральном изображении, целесообразно организовывать (вести) поисковые работы не по всему прилегающему району, а только узким фронтом вдоль протяженной зоны разлома, что приводит к значительной экономии сил, средств и времени.

При выполнении экологических исследований бортовые видеоспектрометры в последние десятилетия успешно применяются в ходе решения региональных и локальных задач [10, 11], причем во многих случаях информационный вклад аэрокосмических данных оказывается неоценимым. В особенности, это относится к антропогенным бедствиям (авариям на нефтепроводах и нефтедобывающих морских платформах, прорывам подводных газопроводов, «залповым» выбросам загрязнений и т. д.), когда необходимо получение в реальном масштабе времени оперативной информации о процессах, происходящих нередко в труднодоступных местах и районах.

Большое значение для решения экологических задач первостепенной важности [12, 13] приобретает разработка и совершенствование видеоспектрометрической аппаратуры с целью улучшения ее пространственного разрешения. Это связано с высокой эффективностью применения видеоспектрометров в случае, когда, например, необходим анализ загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу с дымовыми газами тепловых электростанций (ТЭС), теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и других аналогичных источников. Выбрасываемые в атмосферу вредные вещества при этом можно условно классифицировать на две группы. К первой относятся вещества, количество которых определяется, в основном, составом топлива (оксиды серы, летучая зола, токсичные примеси, содержащиеся в золе, соединения ванадия). Во вторую группу входят вещества, образование которых в значительной мере зависит от технологии, в том числе, от режимов сжигания топлива (оксиды азота и углерода, канцерогенные вещества). Выявление с помощью видеоспектрометрической аппаратуры источников таких выбросов и внедрение средств, контролирующих вредные вещества, особенно второй группы, позволяет достигнуть оптимальности режимов сжигания топлива, что приводит к его экономии при одновременном снижении вредных выбросов в атмосферу.

Повышенное внимание экологов привлечено и к анализу загрязнения атмосферы долгоживущими радиоактивными продуктами, образующимися при работе предприятий атомной промышленности и атомных электростанций (АЭС), что требует глобального мониторинга концентрации радиоактивных изотопов в атмосфере, например, инертного газа криптона. Дистанционное выявление выбросов вредных веществ конкретными трубами ТЭС, ТЭЦ и АЭС обеспечивается только с помощью видеоспектрометров, потому что классические спектральные методы и средства обычно интегрируют по полю зрения картину подстилающей поверхности, сведя к нулю пространственное разрешение на ней, что делает абсолютно невозможной привязку выполненного спектрального анализа к конкретному источнику загрязнений.

В настоящее время наметилась определенная тенденция к объединению видеоспектрометрической аппаратуры с искусственным интеллектом, способным опознавать и идентифицировать исследуемые объекты. Необходимость такого объединения можно проиллюстрировать на следующих примерах.

Было замечено, что повышенное содержание некоторых металлов в почве, например меди или молибдена, по-разному меняет оттенки естественной окраски лесной растительности, надежно распознаваемые видеоспектрометрическими методами и средствами. Другим примером могут служить месторождения алмазов, отождествляемые с кимберлитовыми трубками. Любая такая трубка резко отлична по химическому составу от окружающих ее осадочных отложений. В ней много магния, но полностью отсутствуют необходимые растениям калий и фосфор. Поэтому на кимберлитовых трубках лесная растительность изменяет свой «цветовой облик», что можно увидеть на видеоспектрометрических полноформатных изображениях. Подобные обстоятельства положили начало новому направлению в геологии – геоботанике. Как показала практика

последних десятилетий, надежная дешифровка и идентификация геологических пород и месторождений по растительному покрову не представляет чрезмерной трудности для современных систем искусственного интеллекта, способных к самообучению при обработке больших информационных объемов видеоспектрометрических изображений.

Опыт использования видеоспектрометрической аппаратуры в современных условиях приводит к выводу, что разрабатываемые в последние годы наукоемкие автоматизированные геоинформационные системы целесообразно базировать на новой технологии, интегрирующей итоговую видеоспектрометрическую и компьютерную картографию с системами управления базами данных. Органичное слияние этих двух перспективных направлений дает основание прогнозировать создание многослойных электронных видеоспектрометрических карт, опорный слой которых описывает базовое состояние природных и антропогенных объектов, а каждый из последующих слоев выявляет один из частных аспектов или процессов, интересующих потребителя при получении оперативной экологической, гидрометеорологической и природно-ресурсной информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Van der Meer F. D, De Jong S. M. Imaging Spectrometry. Basic Principles and Prospective Applications. – New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 403 p.

2. Шилин Б. В., Хотяков В. В. Видеоспектральная аэросъемка – ведущее направление дистанционного зондирования в оптическом диапазоне // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 3. – С. 55–58.

3. Красавцев В. М., Семенов А. Н., Чиков К. Н., Шлишевский В. Б. Видеоспектрометры – новая перспективная аппаратура для дистанционных исследований // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 89–94.

4. Петров С. Б., Смирнов А. П. Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования и оперативного контроля окружающей среды // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67, № 5. – С. 82–93.

5. Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. О возможности построения гиперспектральной аппаратуры на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения скрытых объектов в полевых условиях // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 74–79.

6. Афонин А. В., Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. Видеоспектрометрическая аппаратура на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения малых газовых примесей в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 9. – С. 823–826.

7. Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. Статический фурье-спектрометр как основной элемент построения современного гиперспектрального видеоспектрометра // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 87–88.

8. Горбунов Г. Г. Многоспектральная и гиперспектральная аппаратура, мировой уровень, состояние вопроса в России // Оптический вестник. – 2011. – № 132. – С. 5–6.

9. Чиков К. Н., Гуд В. В., Красавцев В. М. Бортовой видеоспектральный комплекс для целей геолого- и экологического картирования // Научные исследования высшей школы по

экологии и рациональному природопользованию. Сб. статей. СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 2000. – С. 173–175.

10. Чиков К. Н., Гуд В. В., Красавцев В. М., Сандаков А. Н. Видеоспектрометры для экологического мониторинга // Известия вузов. Приборостроение. – 1998. – Т. 41, № 3. – С. 5–10.

11. Шилин Б. В., Груздев В. Н., Марков А. В., Мочалов В. Н. Использование видеоспектральной аэросъемки для экологического мониторинга // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 12. – С. 41–49.

12. Красавцев В. М., Семенов А. Н., Чиков К. Н., Шлишевский В. Б. Некоторые особенности расчета и проектирования перспективных видеоспектральных систем для дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 2. – С. 164–169.

13. Груздев В. Н., Красавцев В. М., Марков А. В., Чиков К. Н., Шилин Б. В. Действующие образцы видеоспектрометров для малого космического аппарата // Региональная экология.– 2010.– № 3.– С. 112–117.

© Г. Г. Горбунов, К. Н. Чиков, В. Б. Шлишевский, 2015

УДК 528.7

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ИЗМЕНЕНИЙ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Антонина Сергеевна Гордиенко
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-00-00, e-mail: a.s.gordienko@ssga.ru

В данной статье приводится исследование возможностей применения индексных изображений при выявлении изменений по снимкам среднего разрешения. На примере снимков Landsat 7.

Ключевые слова: NDVI, SAVI, GEMI, выявление изменений, космические снимки среднего разрешения.

APPLICATION INDEX IMAGES FOR CHANGE DETECTION IN MULTITEMPORAL SPACE IMAGES

Antonina S. Gordienko
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., senior lecturer, department of physical geodesy and remote sensing, tel. (383)361-00-00, e-mail: a.s.gordienko@ssga.ru

This article describes research opportunities for application of index images for change detection on medium-resolution images. On the example of Landsat 7.

Key words: NDVI, SAVI, GEMI, change detection, space images of medium-resolution.

В настоящее время существует большое количество различных методик и технологий выявления изменений по разновременным аэрокосмическим снимкам, которые основаны на использовании спектральных, структурных, геометрических и комплексных дешифровочных признаков [1-7,9-10]. В данной работе использовались индексные изображения, так как для выявления изменений природных объектов по снимкам среднего разрешения нет необходимости применять сложные алгоритмы. А расчет индексных изображений доступен в любом специализированном программном обеспечении.

Целью данной работы является исследование возможности применения различных индексов для выявления изменений по разновременным космическим снимкам. При выполнении данного исследования в качестве исходных данных использовались многоспектральные снимки на территорию Новосибирска, которые были получены со спутника Landsat 7 в 2009 и 2011 году. В качестве программного обеспечения использовался программный продукт ENVI.

Сначала было выполнено трансформирование снимков, так как качество привязки исходных данных не удовлетворяло поставленной цели. Средняя квадратическая ошибка привязки составила 0,3 пикселя.

Проанализировав визуально исходные изображения можно сделать вывод, что основные изменения произошли для таких типов объектов как растительность, почва и городская застройка.

Таким образом, были выбраны следующие индексы: нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI, почвенный индекс SAVI и индекс глобального мониторинга окружающей среды GEMI.

Нормализованный разностный вегетационный индекс (*NDVI*) вычисляется по известной формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где *RED* – яркость элементов изображения в красном канале;

NIR – яркость элементов изображения в ближнем инфракрасном канале.

Почвенный индекс (SAVI) вычисляется по формуле:

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}(1 + L), \quad (2)$$

где L = [0;1] и зависит от степени облиственности.

GEMI - это индекс глобального мониторинга окружающей среды, который вычисляется по формуле:

$$GEMI = E(1 - 0{,}25E) - \frac{RED - 0{,}125}{1 - RED}, \quad (3)$$

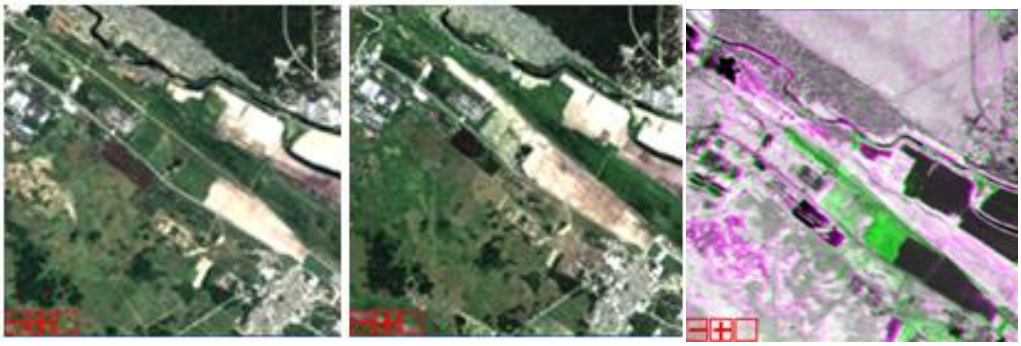
$$E = \frac{2(NIR^2 - RED^2) + 1{,}5NIR + 0{,}5RED}{NIR + RED + 0{,}5}. \quad (4)$$

При использовании вегетационного индекса NDVI, как и следовало ожидать, очень хорошо видны изменения, произошедшие в растительном покрове. По данным изображениям видны также незначительные изменения, которые на исходных снимках практически не заметны. Пример использования вегетационного индекса NDVI представлен на рис. 1.

а) б) в)

Рис. 1. Результат применения вегетационного индекса NDVI:
а) фрагмент сходного снимка 2009 года; б) фрагмент исходного снимка 2011 года;
в) фрагмент композита, составленный по разновременным индексным (NDVI) изображениям

Почвенный индекс SAVI, в отличие от NDVI, позволил выявить более полную картину изменений, произошедших на местности (рис. 2).



а) б) в)

Рис. 2. Результат применения почвенного индекса SAVI:
а) фрагмент сходного снимка 2009 года; б) фрагмент исходного снимка 2011 года;
в) фрагмент композита, составленный по разновременным индексным (SAVI) изображениям

Индекс глобального мониторинга окружающей среды GEMI, в отличие от вегетационного индекса NDVI и почвенного индекса SAVI, помимо произошедших изменений на местности, показал очень зашумленный результат (много ошибочной информации, выдаваемой как изменения). Результаты применения индекса GEMI представлены на рис. 3.

а) б) в)

Рис. 3. Результат применения индекса глобального мониторинга окружающей среды GEMI:
а) фрагмент сходного снимка 2009 года; б) фрагмент исходного снимка 2011 года;
в) фрагмент композита, составленный по разновременным индексным (GEMI) изображениям

Индексные изображения достаточно популярный способ получения информации о растительном и почвенном покровах. Они широко используются для выявления состояния посевов, прогнозирования урожайности, определения заболеваний растений и др. [8] Данная работа показала, что индексные изображения могут успешно применяться при выявлении изменений по снимкам среднего разрешения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических снимков. Выявление изменений состояния территорий и объектов по многозональным космическим снимкам, полученным на разные даты / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, Е. П. Хлебникова, М. А. Алтынцев, С. А. Арбузов, А. С. Гордиенко, А. А. Гук // Геодезия и картография. – 2013. – № 8. – С. 33–41.

2. Алтынцев М. А., Гордиенко А. С., Гук А. А. Вейвлет-анализ для выявления вырубок в лесных массивах по аэрофотоснимкам // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 3–8.

3. Бучнев А. А., Пяткин В. П., Салов Г. И. Выделение кольцевых структур на космических снимках // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 3–10.

4. Гордиенко А. С. Использование вейвлет-анализа при обработке аэрокосмических снимков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 2. – С. 68–71.

5. Гордиенко А. С., Алтынцев М. А., Арбузов С. А. Разработка методики многоступенчатого дешифрирования космических снимков // Сб. тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Фотограмметрия – вчера, сегодня, завтра», Москва. – 2010. – С. 48–49.

6. Гук А. П., Арбузов С. А., Гук А. А. Использование метода независимых компонент при дешифрировании снимков лесных массивов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 3–7.

7. Локализация изменений объектов природно-территориальных комплексов по разновременным космическим снимкам / А. П. Гук, Л. Г. Евстратова, А. С. Гордиенко, М. А. Алтынцев // Геодезия и картография. – 2010. – № 2. – С. 19–25.

8. Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Захватов М. Г. Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 67–72.

9. Середович В. А., Попов Р. А., Алтынцев М. А. Выявление изменений в инфраструктуре города по данным мобильного лазерного // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 156–160.

10. Широкова Т. А., Антипов А. В., Арбузов С. А. Определение изменений на местности с применением данных лидарной съемки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 38–45.

© А. С. Гордиенко, 2015

УДК 528.711.18:550.83:608

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕМЕТРИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ КАМЕР ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дмитрий Николаевич Раков
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (951)907-21-09, e-mail: dir142@211.ru

Вячеслав Николаевич Никитин
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Станислав Олегович Шевчук
ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, и. о. зав. отделом геодезического обеспечения геолого-геофизических работ, тел. (383)22-45-86, e-mail: staspp@211.ru

Рассмотрены аспекты использования цифровых неметрических фотокамер для определения высоты выносной вертолетной платформы над земной поверхностью. В частности, рассмотрена возможность применения фотокамер со шторно-щелевым затвором с учетом геометрических искажений, вносимых им.

Ключевые слова: неметрические камеры, шторно-щелевой затвор, аэросъемка, фотограмметрия, альтиметрия, истинная высота, геодезическое обеспечение.

USE NON-METRIC DIGITAL CAMERAS DURING AIRBORNE GEOPHYSICAL RESEARCHES

Dmitry N. Rakov
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., a post-graduate student of department of physical geodesy and remote sensing, tel. (951)907-21-09, e-mail: dir142@211.ru

Vyacheslav N. Nikitin
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Assoc. Prof. of department of physical geodesy and remote sensing, tel. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Stanislav O. Shevchuk
Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, 630108, Russia, Novosibirsk, 67 Krasniy Prospekt, acting as head of department of geodetic maintenance of geological and geophysical works, tel. (383)22-45-86, e-mail: staspp@211.ru

In article the aspects of the use of non-metric digital camera for remote helicopter platform's height-above-ground determination are considered. The possibility of using cameras with a focal-plane shutter proposed with review of geometric distortions introduced by them.

Key words: non-metric camera, focal-plane shutter, aerial survey, photogrammetry, height-above-ground, altimetry, geodetic support.

Электромагнитная разведка методом становления электрического поля в комплексе с магнито- и спектрометрией с использованием вертолетных разведочных платформ является тенденцией развития опережающих поисково-оценочных технологий. Эти системы характеризуются высокой разрешающей способностью, глубинностью исследований, и позволяют оперативно оценивать перспективность труднодоступных территорий [1]. В публикациях [1,2,3,4] рассмотрен аэроэлектромагнитный комплекс «Импульс-Аэро», в частности, вопросы, связанные с навигационным и геодезическим обеспечением аэрогеофизической съемки [5,6].

Появление цифровых съёмочных систем и методов автоматической обработки фотограмметрических измерений создало возможность их применения для эффективного решения некоторых задач навигационно-геодезического обеспечения аэрогеофизики, трудно реализуемых посредством ГНСС и других методов.

В частности, отдельной нетривиальной задачей при проведении аэроэлектромагнитной съемки является определение истинной высоты (высоты над земной поверхностью) выносной приемно-генераторной конструкции (платформы) электромагнитного комплекса. Согласно [5], определение истинной высоты платформы, при ее перемещении на уровне 50 м, должно производиться с предельной погрешностью, не превышающей 1,2 м (СКП $2\sigma \leq 0{,}6$ м), что обеспечивает относительную точность измерения сигнала 5%.

Для решения данной задачи были предложены фотограмметрический способ и устройство, описанные в публикациях [7,8,9]. На указанные способ и устройство получен патент РФ [10].

Способ основан на синхронной съёмке земной поверхности парой предварительно откалиброванных неметрических камер, закреплённых на выносной платформе. При этом расстояние между ними остаётся неизменным на протяжении всего полёта, а угловые элементы внешнего ориентирования системы определяются посредством ИНС (с коррекцией по измерениям ГНСС).

Блок-схема, иллюстрирующая работу устройства, основанного на данном способе и размещение камер на платформе типа «Импульс-Аэро» показаны на рис. 1 и 2.

Преимуществами указанного способа является невысокая стоимость, независимость от углового положения платформы и наличие избыточной информации (например, на основе снимков может составляться накидной монтаж исследуемой территории для анализа при обработке геофизических измерений).

Факторы, осложняющие реализацию фотограмметрического способа определения истинных высот платформы, были определены и проанализированы в [11] на уровне теоретического моделирования. Среди них: погрешности фотограмметрического метода (включающие дисторсию объективов камер), погрешности блока ИНС; погрешности измерения базиса B на земле; погрешности угловой калибровки системы (наличие углов между начальным положением камер и ИНС); деформации платформы; асинхронность экспонирования камерами; погрешности синхронизации системы по времени с другими элементами аэроэлектроразведочного комплекса.

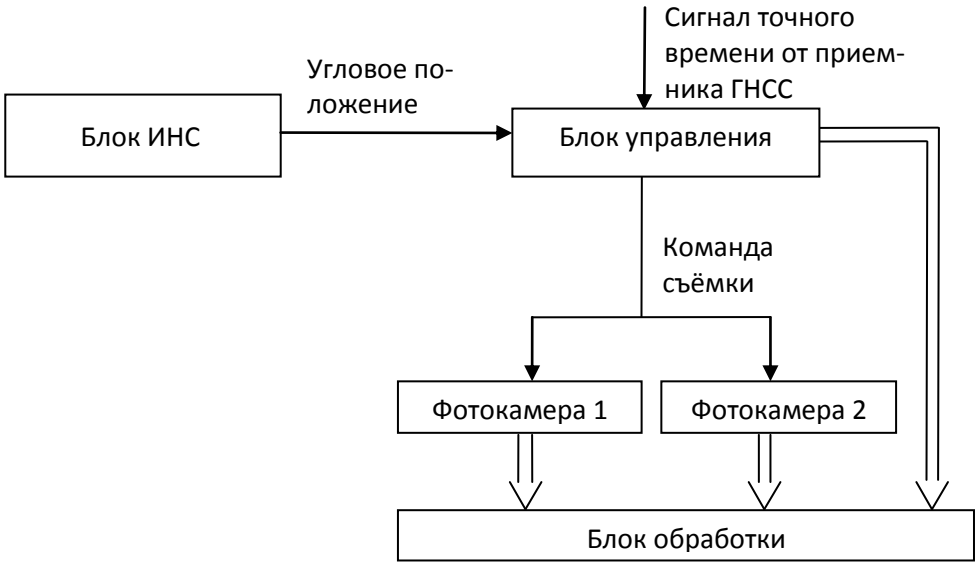


Рис. 1. Состав и схема функционирования устройства, определяющего превышение выносной аэрогеофизической платформы над земной поверхностью

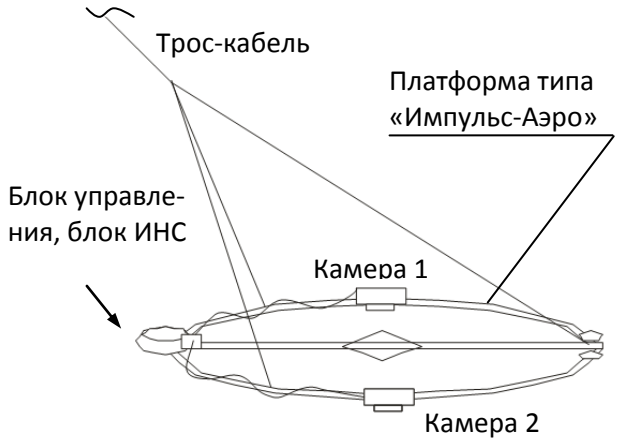


Рис. 2. Размещение блоков фотографического устройства на платформе

Исследования способа и устройства подтвердились при практических испытаниях способа в 2013 году при выполнении аэрогеофизических работ в Курагинском районе Красноярского края, однако появились и новые, ранее не учтенные факторы, понижающие точность и надежность измерения высоты с помощью неметрических камер, связанных в первую очередь с их конструктивными особенностями.

В настоящее время в неметрических камерах применяются электронные, центральные и шторно-щелевые затворы. Электронные затворы, как правило, используются в камерах компактного класса, не позволяющие получать снимки с высоким фотографическим качеством. Центральный затвор для неметрических камер является «экзотическими» и реализуется в очень небольшом количестве моделей компактного класса, например Sony RX1. Большинство профессиональных и полупрофессиональных камер с матрицей большого размера

оснащаются шторно-щелевыми затворами. К таким и относится камера Sony NEX-3, которая и использовалась в аэроэлектромагнитном комплексе «Импульс-Аэро».

Для аэрофотосъемки с малых и беспилотных летательных аппаратов оптимальным вариантом является использование цифровых неметрических камер с центральным затвором. Такие затворы обеспечивают одновременное экспонирование всего поля снимка, что, в свою очередь, позволяет обеспечить достаточное качество фотоматериала для фотограмметрических построений. На длинных выдержках затворы такого типа при движении носителя вносят смаз изображения, которые можно учесть при обработке. Интенсивность смаза зависит от выдержки, скорости движения носителя и высоты фотографирования.

Однако наибольшее распространение из-за оптимального критерия «цена-качество» получили неметрические зеркальные и гибридные беззеркальные камеры, одной из конструктивных особенностей которых является шторно-щелевой затвор. Стабильность его работы играет большую роль в формировании изображения. Вследствие того, что изображение при работе такого затвора формируется не одномоментно, как с применением центральных затворов, а последовательно за счет движения щели, в момент фотографирования при движении носителя происходит нарушение ортоскопии изображения [12,13]. Виды нарушений ортоскопии изображения вносимых в изображение квадрата при различных направлениях движения камеры можно увидеть на рис. 3.

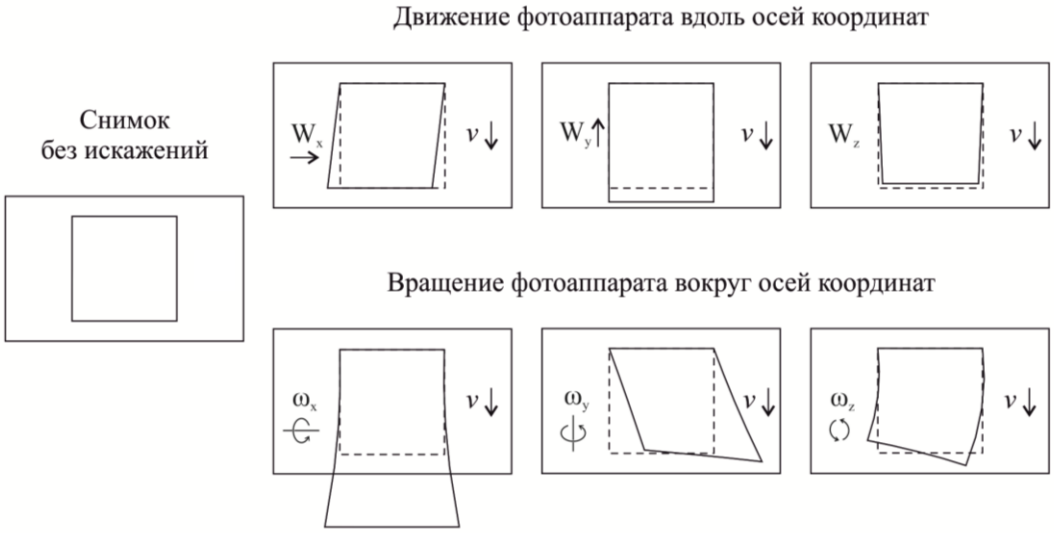


Рис. 3. Нарушения ортоскопии изображения фотоаппаратов со шторно-щелевым затворами при собственном движении камеры

Математически эти зависимости можно выразить в следующем виде:

$$W_x: \qquad \Delta x = f \cdot \frac{W_x}{H} \cdot \frac{y}{v_ш}, \tag{1}$$

W_y: $$\Delta y = f \cdot \frac{W_y}{H} \cdot \frac{y}{v_ш}, \quad (2)$$

W_z: $$\Delta x \approx -x \cdot \frac{W_z \cdot y}{H \cdot v_ш}, \quad \Delta y \approx -y \cdot \frac{W_z \cdot y}{H \cdot v_ш}, \quad (3)$$

ω_x: $$\Delta y = f \cdot \omega_x \cdot \frac{y}{v_ш}, \quad (4)$$

ω_y: $$\Delta x = f \cdot \omega_y \cdot \frac{y}{v_ш}, \quad (5)$$

ω_z: $$\Delta x \approx -y \cdot \omega_z \cdot \frac{y}{v_ш}, \quad \Delta y \approx x \cdot \omega_z \cdot \frac{y}{v_ш}. \quad (6)$$

где f – фокусное расстояние, пикс;

W_x, W_y, W_z – линейная скорость движения камеры в системе координат снимка, м/с;

ω_x, ω_y, ω_z – угловая скорость вращения камеры, в системе координат снимка, рад/с;

H – высота фотографирования, м;

$v_ш$ – скорость движения шторки затвора, пикс/с;

x, y – координаты точек в системе координат снимка, пикс.

Выражения 3-6 представлены в несколько упрощенном виде.

Особенностью альтиметрической системы платформы «Импульс-Аэро» является синхронная съемка двумя камерами. Очевидно, что на точность определения высоты платформы будут оказывать влияние не абсолютные величины смещений точек на снимке в следствии нарушения ортоскопии, а разность их функционалов:

$$h = \frac{B_Z}{2} - Z_A = \frac{B_Z}{2} - (-f) \cdot \frac{B_X + \frac{x_2^o}{f} \cdot B_Z}{p^o} = \frac{B_Z}{2} + f \cdot \frac{B_X + \frac{x_2^o}{f} \cdot B_Z}{p^o}, \quad (7)$$

где B_X, B_Z – проекции базиса на оси X, Z;

Z_A – координата Z точки в заданной системе координат;

x_2^o – координата x в системе координат горизонтированного снимка;

p^o – горизонтированный продольный параллакс.

Ключевым параметром в данной формуле является горизонтированный продольный параллакс, который вычисляется как разность горизонтированных координат точек на первом и втором снимках по оси *x*.

Таким образом, если камеры сориентированы одинаково, то есть матрицы направляющих косинусов, определенных через элементы взаимного ориентирования снимков, будут приблизительно равны ($A_1' \approx A_2'$), то линейные и угловые движения в системе координат снимков будут равны друг другу, а ошибки первой и второй камеры, вызванные нарушением ортоскопии, будут взаимно вычитаться. И наоборот, если камеры развернуты вокруг оси *Z* на 180° относительно друг друга, то линейные и угловые скорости первой и второй камеры по осям *x* и *y* будут противоположны по знакам.

Рассчитаем допустимые значения линейных и угловых скоростей для различных вариантов размещения камер Sony NEX-3 на платформе «Импульс-Аэро» исходя из требований к точности альтиметрических измерений.

Предельной ошибкой определения высоты платформы вызванной влиянием шторно-щелевого затвора $m_{h_{ШЩЗ}}$ примем 0,1 от допустимой СКО определения высоты платформы m_h:

$$m_{h_{ШЩЗ}} = \frac{m_h}{10} = 5. \tag{8}$$

Для расчетов примем следующие условия: высота фотографирования 50 м; $B_x = 15$ м; $B_z = 0$ м; $f = 3000$ пикс (Sony NEX-3); продольный и поперечный углы наклона платформы 15°. Тогда:

$$m_h^2 = \left(- f \cdot \frac{B_x}{p^{o^2}} \right)^2 \cdot m_{p^o}^2 \Rightarrow$$

$$m_{p^o_{ШЩЗ}} = \frac{m_{h_{ШЩЗ}}}{f \frac{B_x}{p^{o^2}}}. \tag{9}$$

Для указанных условий СКО определения горизонтированного продольного параллакса не должна превышать 0,9 пикс.

Придельные значения рассчитанных параметров движения платформы для различных вариантов размещения фотоаппаратов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Предельные значения параметров движения в зависимости от положения камер относительно друг друга

Случаи съёмки	W_x , м/с	W_y , м/с	W_z , м/с	ω_x , гр./с	ω_y , гр./с	ω_z , гр./с
$\varkappa_1$=0 $\varkappa_2$=0	47	129	52	148	53	740
$\varkappa_1$=0 $\varkappa_2$=180	8	96	291	110	8	980
$\varkappa_1$=90 $\varkappa_2$=90	10	69	45	79	11	490
$\varkappa_1$=80 $\varkappa_2$=270	7	65	66	74	8	520

Ось *y* соответствует преимущественному направлению движения платформы во время съемки. Из всех рассмотренных вариантов предпочтение следует отдать первому варианту как наиболее устойчивому к поперечному сносу и продольному кручению (относительно траектории полета). Остальные предельные значения параметров значительно превышают параметры, которые могут возникать в процессе эксплуатации.

Проведенные исследования позволяет сделать вывод о применимости неметрических камер со шторно-щелевым типом затвора для выполнения альтиметрических измерений на платформе «Импульс-Аэро».

В целом, методика, включающая определение высоты фотограмметрическим способом (наряду с измерениями остальных навигационно-геодезических параметров посредством ГНСС и радиовысотомера), обеспечивает определение навигационно-геодезических параметров аэрогеофизической съёмки с необходимой точностью и в значительной мере повышает качество и эффективность аэрогеофизических исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тригубович Г.М. Инновационные поисково-оценочные технологии электроразведки становлением поля воздушного и наземного базирования [Текст] // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 8. – С. 80–87.
2. Особенности построения высокоточной аэрогеофизической системы серии «импульс-аэро» / С. В. Барсуков, А. А. Белая, Ю. Ю. Дмитриев, А. С. Сверкунов, Е. Н. Махнач, Г. М. Тригубович // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 224–229.
3. Тригубович Г. М., Персова М. Г., Саленко С. Д. Аэрогеофизические вертолетные платформы серии «Импульс» для поисково-оценочных исследований [Текст] // Приборы и системы разведочной геофизики – 2006. – № 2(16) – С. 18–21.
4. Kamenetsky F. M. Transient Geo-Electromagnetics [Text] / F.M. Kamenetsky, E.H. Stettler, G.M. Trigubovich – Англ. – Ludwig-Maximilian-University of Munich. Dept. of the Earth and Environmental Sciences. Section Geophysics. - Munich, 2010. - 296 p., 2010. - 296 с.
5. Навигационно-геодезическое обеспечение аэрогеофизических исследований / Г.М. Тригубович, С.О. Шевчук, А.А. Белая [и др.] // Геология и Минерально-сырьевые ресурсы Сибири – 2013. – № 2. – С. 61–69.
6. Шевчук С. О. Навигационное и геодезическое обеспечение аэроэлектромагнитных исследований с подвесной вертолётной платформой [Текст] // Геология и Минерально-сырьевые ресурсы Сибири – 2012. – № 2. – С. 72–75.

7. Кузин В. И., Шевчук В. Н., Никитин С. О. Фотограмметрический способ и устройство для определения истинной высоты выносной вертолётной платформы аэрогеофизического комплекса «Импульс-Аэро» // Изв. вузов Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2013. – № 4. – С. 86–92.

8. Шевчук С. О., Никитин В. Н. Способы определения истинной высоты аэрогеофизической вертолётной электроразведочной платформы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 74–82.

9. Шевчук С. О., Никитин В. Н. Фотограмметрический способ получения истинной высоты выносной вертолётной платформы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII междунар. науч. конгр. 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск: сб. молодых ученых СГГА. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 96–101.

10. Пат. 2508525 Российская Федерация МПК[51] GO1C 11/04 GO1V 3/16 Фотограмметрический способ определения превышений подвижного объекта над земной поверхностью и устройство для аэрогеофизической разведки, реализующее его [Текст] С. О. Шевчук, В. Н. Никитин, С. В. Барсуков; заявители и патентообладатели: Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», Общество с ограниченной ответственностью Геофизическое предприятие «Сибгеотех» . – 2012139733; заявл. 17.09.2012; опубл. 27.02.2014 – Бюл. № 6. – 11 с.

11. Шевчук С. О. Факторы, влияющие на точность определения истинной высоты выносной вертолётной платформы аэрогеофизического комплекса «Импульс-Аэро» [Текст] // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 34–46.

12. Кучко А. С. Аэрофотография (Основы и метрология). – М.: Недра, 1974. – 272 с.

13. Лаврова Н. П., Стеценко А. Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование: учебник для вузов. – М.: Недра, 1981. – 296 с.

© Д. Н. Раков, В. Н. Никитин, С. О. Шевчук, 2015

УДК 528.94(528.85):63:004

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ LANDSAT 8 ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ

Елена Витальевна Казяк
Белорусский государственный университет, 220030, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ленинградская, 14, аспирантка, тел. (37544)549-50-75, e-mail: ko4ubok@tut.by

Александр Васильевич Лещенко
Белорусский государственный университет, 220030, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ленинградская, 14, студент, тел. (37529)350-71-31, e-mail: a_leshenko@tut.by

В статье изложена методика автоматизированного распознавания видовой структуры посевов сельскохозяйственных культур по мультиспектральным космическим снимкам. Приведены результаты классификации отдельных культур по исходному снимку и на основе спектральных преобразований (по методу главных компонент, преобразование Tasseled Cap, нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI). Представлена карта растительности агроэкосистем, созданная по результатам дешифрирования.

Ключевые слова: агроэкосистема, дешифрирование, классификация с обучением, спектральные преобразования, Landsat 8.

SPECTRAL TRANSFORMATION OF SPACE IMAGES LANDSAT 8 FOR AGROECOSYSTEMS VEGETATION MAPPING

Elena V. Kaziak
Belarusian State University, 220030, Belarus, Minsk, 14 Leningradskaya St., postgraduate student, tel. (37544)549-50-75, e-mail:ko4ubok@tut.by

Alexander V. Leshchenko
Belarusian State University, 220030, Belarus, Minsk, 14 Leningradskaya St., student, tel. (37529)350-71-31, e-mail: a_leshenko@tut.by

The paper sets out the methodology of automated recognition of specific structure of crops on multispectral satellite images. The results of the research of the effectiveness of spectral transformations (using principal component transformation Tasseled Cap, normalized difference vegetation index NDVI) are provided in the article. The accuracy of the classification of individual cultures on the original picture and on the basis of spectral indices values was also compared. The map, created as a result of decoding is provided.

Key words: agroecosystem, decoding, classification learning, spectral transforms, Landsat 8.

Агроэкосистемы - это искусственно созданные и регулируемые человеком биотические сообщества культурных растений с их экотопами (местоположениями) с целью получения сельскохозяйственной продукции [1]. Наличие достоверной и актуальной информации об их основном компоненте - посевах сельскохозяйственных культур - является важным условием проведения эффективной аграрной политики. Однако изучение и картографирование агроэкосистем сопряжено с особыми трудностями, что обусловлено высокой динамично-

стью сельскохозяйственной растительности в результате ежегодной смены на полях (севооборот).

В Беларуси основным источником информации о выращиваемых в сельскохозяйственных организациях культурах являются книги истории полей. Однако содержащиеся в них информация не может быть признана полностью достоверной, т.к. такие книги опираются только на предоставленные агрономами данные и в силу различных причин часто бывают искажены. Для оценки эффективности аграрной политики необходима разработка методики независимого и оперативного дешифрирования видовой структуры посевов.

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований по автоматизированному дешифрированию видовой структуры сельскохозяйственных культур (ржи озимой, пшеницы озимой, пшеницы яровой, тритикале озимого, рапса озимого, ячменя, овса, гречихи, кукурузы, многолетних трав и зернобобовых) на основе материалов ДЗЗ с использованием геоинформационных технологий.

В качестве основного источника информации выступили материалы космической съемки спутниковой системы Landsat 8. Тестовые поля расположены на территории одной из сельскохозяйственных организаций Смолевичского района Минской области, их общая площадь составила 9799 га (257 полей). На территорию исследования был составлен архив из 8 сцен за период с 23 марта по 30 августа 2014.

На этапе предварительной обработки все снимки подверглись радиометрической и атмосферной коррекции (способом вычитания абсолютно черных объектов). Для повышения качества последующей тематической обработки применялся векторный слой полей, который использовался в качестве маски для дешифрирования [2].

Ключевым элементом исследования являлось использование различных спектральных преобразований многозональных снимков для повышения эффективности результатов распознавания. Спектральные предобразования заключаются в алгебраических преобразованиях яркостей, или коэффициентов отражения каналов многозональных спутниковых данных (табл. 1). В программном пакете ENVI 5.2. по трем безоблачным сценам Landsat (за 19.05, 29.07 и 14.08.2014) были рассчитаны следующие спектральные индексы: нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), преобразование Tasseled Cap и главных компонент.

Таблица 1

Формулы анализируемых спектральных индексов

Главных компонент	1	0,054TM2+0,130TM3+0,143TM4+0,595TM5+0,709TM6+0,321TM7
	2	-0,079TM2+0,121TM3+0,212TM4+0,787TM5+0,421TM6+0,372TM7
	3	0,230TM2+0,504TM3+0,616TM4+0,140TM5+0472TM6+0,266TM7
Tasseled Cup	1	0,304TM2+0,279TM3+0,474TM4+0,599TM5+0,508TM6+0,186TM7
	2	-0,285TM2-0,244TM3-0,544TM4+0,704TM5+0,084TM6-0,180TM7
	3	0,151TM2+0,197TM3+0,328TM4+0,341TM5-0,711TM6-0,457TM7
NDVI		(TM5-TM4)/(TM5+TM4)

Исходные снимки и картограммы вышеуказанных спектральных индексов послужили основой для классификации спектральных признаков культур. Для этого на каждую из культур создавалось несколько спектральных эталонов. Процесс эталонирования заключался в обозначении на изображении области, с заранее известной информацией о сельскохозяйственной культуре (данные из книги истории полей, уточненные в результате визуального анализа снимков).

После этого для трех исходных изображений, а затем для индексных снимков проводилась контролируемая классификация и проверка ее точности. Для достоверного сопоставления эффективности индексов необходимо было применять одни и тех же эталонные области на изображениях, а также пользоваться одинаковыми правилами классификации спектральных признаков [3]. В нашем случае классификация проводилась по правилу максимального правдоподобия.

Точность классификации оценивалась как процент правильно распознанных полей той или иной культуры. Кроме того, по итогам дешифрирования оценивалась суммарная точность классификации культур по снимку и значениям каждого индекса (табл. 2).

Таблица 2

Точность дешифрирования сельскохозяйственных культур по исходному снимку и картограммам его спектральных индексов, (%)

Дата съемки/ спектр. индекс	19.05.2014				29.07.2014				14.08.2014			
	Исходный снимок	NDVI	Tasseled Cup	Главных компонент	Исходный снимок	NDVI	Tasseled Cup	Главных компонент	Исходный снимок	NDVI	Tasseled Cup	Главных компонент
Пшеница озимая	100	38.9	100	100	100	38.9	100	100	73.4	46.1	70.6	73.4
Рожь озимая	100	31.5	100	100	100	31.5	100	100	85.6	25.7	84.4	85.6
Тритикале	99.7	32,0	99,3	99.6	99	31.9	99,3	99,6	74.0	9.76	71.7	74.0
Рапс	100	82.9	100	100	100	82.8	100	100	100	38.9	100	100
Пшеница яровая	98.8	43.1	97,6	98.8	97	43.0	97,0	98,8	90.5	33.1	89.8	90.6
Ячмень	99.6	81.4	99,6	99.6	96	81.3	98,1	99,6	69.9	22.9	69.6	70,0
Овес	100	53.4	98,7	100	100	53.4	98,6	100	82.0	15.8	76.2	82.0
Гречиха	94,9	65,1	96,2	94,9	94,9	65.1	96,2	94,9	82.5	8.98	68.4	82.6
Зернобобовые	95,5	35,5	96,4	95,6	95,6	35.4	96,4	95,6	32.4	0.00	33.7	32.5
Кукуруза	100.	87.7	99,7	100	100	87.7	99,7	100	83.2	26.8	79.9	83.3
Мн.травы	100.	93.0	100	100	100	93.0	100	100	88.2	78.2	84.3	88.3
Суммарная точность	93.2	64.9	94,4	94,0	90,2	62.8	91,4	91,9	77.0	35.5	75.7	77.4

Как видно из табл. 2, суммарная точность дешифрирования культур по исходному снимку, с использованием спектральных преобразований Tasseled Cup

и главных компонент имеет очень высокие показатели (более 93 %). Использование вегетационного индекса NDVI ведет к снижению достоверности распознавания сельскохозяйственных посевов. При этом следует отметить, что точность классификации значительно зависит не только от выбранного метода спектральных преобразований, но и от даты съемки, за которую был взят космический снимок. Наибольшая точность дешифрирования отмечена для изображений за 19.05.2014. Это объясняется тем фактом, что в данный период отражательные характеристики растительных культур максимально различимы между собой (характерно для периода конца мая - первой половины июня). Снимок за август показал более низкие результаты, так как к этому времени часть посевов уже была убрана с полей и отражательные свойства почвы стали вносить свои особенности в отражательный спектр.

Сопряженный анализ снимков в программном продукте ENVI с использованием ГИС-технологий позволил получить исходную карту посевов (по предоставленным хозяйством данным) и карту, отражающую реальную структуру растительности агроэкосистем (по космическим снимкам, рис. 1).

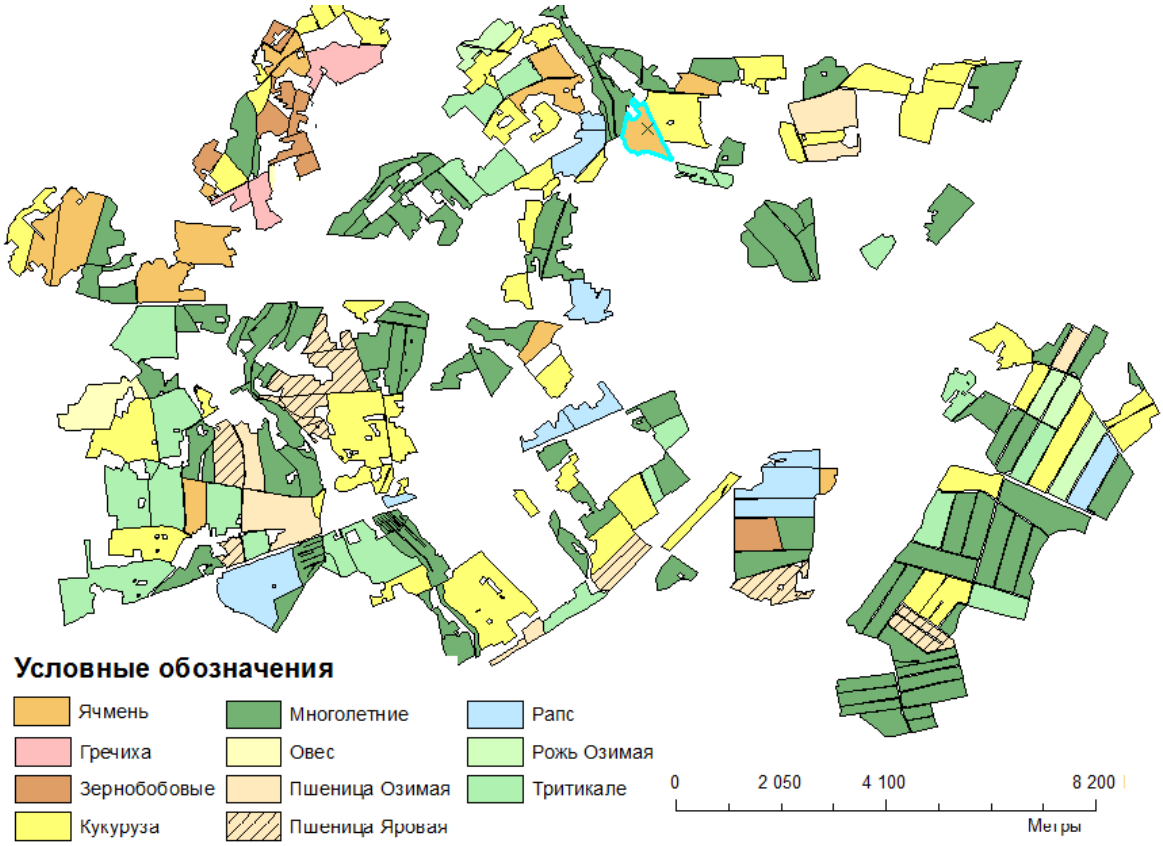


Рис. 1. Структура растительности агроэкосистем,
полученная по результатам дешифрирования

Обнаруженные в результате ГИС-анализа несоответствия отображены на рис. 2. При этом можно утверждать, что ошибки были допущены при внесении информации в книгу истории полей, а не по результатам классификации, о чем свидетельствуют высокие показатель точности распознавания.

Рис. 2. Картосхема несоответствия результатов дешифрирования и данных из книги истории полей

Таким образом, проведенные исследования наглядно демонстрируют, что материалы ДДЗ являются надежным источником получения объективной, непредвзятой информации о структуре посевов сельскохозяйственных культур. Разработанный подход и обнаруженные на его основе особенности распознавания агроэкосистем, могут быть применены для проведения детального дешифрирования сельскохозяйственных угодий, объяснения хода вегетационных кривых агроэкосистем. Наличие серии таких карт за разные годы позволит проводить качественный анализ, эффективное планирование и контроль землепользования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Codex Alimentarius: Organically Produced Foods. Food and Agriculture Organization of the United Nations and the World Health Organization. Rome, Italy, 2001. – 220 P.

2. Мышляков С.Г. Картаграфаванне пасевау сельскагаспадарчых культур па касмічных здымках землеупарадкавання і аутарскага нагляду // Земля Беларуси: научно-производственный журнал. – 2012. - № 1. – С. 52-56.

3. Терехин Э.А. Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрования сельскохозяйственной растительности // Современые проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т.9 № 4. – С. 243-248.

© Е. В. Казяк, А. В. Лещенко, 2015

УДК 528.88

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ЗЕМЕЛЬНЫХ УГОДИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ (НА ПРИМЕРЕ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА)

Елена Витальевна Казяк
Беларусский государственный университет, 220050, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ленинградская 14, аспирантка, преподаватель кафедры геодезии и картографии, тел. (044)549-50-75, e-mail: ko4ubok@tut.by

Анна Александровна Кохно
Беларусский государственный университет, 220050, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ленинградская 14, студентка 4-го курса кафедры геодезии и картографии, тел. (044)798-20-71, e-mail: anna_kohno94@mail.ru

Екатерина Олеговна Хрущева
Беларусский государственный университет, 220050, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ленинградская 14, студентка 4-го курса кафедры геодезии и картографии, тел. (033)659-30-13, e-mail: katekhrushcheva@gmail.com

Проведен автоматизированный анализ (радиометрическая и атмосферная коррекция, контролируемая и неконтролируемая классификация) космических снимков спутниковой системы Landsat. Дана оценка современной структуры земельных угодий Полесского ГРЭЗ, выявлена динамика земель при резком сокращении антропогенной нагрузки в период с 1986 по 2014 год, составлена тематическая карта земельных угодий на территорию заповедника.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование земель, особо охраняемые природные территории (ООПТ), динамика экосистем.

RESEARCH OF STRUCTURE AND DYNAMICS OF LAND BASED ON REMOTE SENSING (ON THE EXAMPLE POLESIE STATE RADIATION ECOLOGICAL RESERVE)

Elena V. Kaziak
Belarusian State University, 220030, Belarus, Minsk, 14 Leningradskaya St., postgraduate student, tel. тел. (044)549-50-75, e-mail: ko4ubok@tut.by

Anna A. Kohno
Belarusian State University, 220030, Belarus, Minsk, 14 Leningradskaya St., student of the 4th year students of the Department of geodesy and cartography, tel. (044)798-20-71, e-mail: anna_kohno94@mail.ru

Ekaterina O. Khrushcheva
Belarusian State University, 220030, Belarus, Minsk, 14 Leningradskaya St., student of the 4th year students of the Department of geodesy and cartography, tel. (033)659-30-13, e-mail: katekhrushcheva@gmail.com

An automated analysis (radiometric and atmospheric correction, supervised and unsupervised classification) space imagery satellite system Landsat was made up. The estimation of the modern structure of land Polessky SRER was conduct. Revealed the dynamics of land while dramatically reducing the anthropogenic load in the period from 1986 to 2014, compiled thematic map of land on the reserve.

Key words: automated interpretation of land, protected areas (SPNA), the dynamics of ecosystems.

Использование оперативной глобальной космической информации позволяет успешно осуществлять географические исследования особо охраняемых природных территорий (ООПТ), выявлять и оценивать происходящие в них изменения. Современные спутниковые системы имеют высокое пространственное разрешение и создают определенные перспективы на улучшение распознавания и классификации объектов, и предназначены для исследований природных экосистем на больших по площади территориях[1].

Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ПГРЭЗ) представляет особое значение для изучения современной структуры и разработки прогноза динамики природных ландшафтов и геосистем Беларуси. Заповедник имеет площадь 216,8 тыс. гектаров и является крупнейшей по размерам природоохранной зоной республики. Это уникальная территория с полным отсутствием антропогенной нагрузки, которая может служить резерватом сохранения биоразнообразия региона Полесья, Беларуси и Европы в целом. Заповедник был создан в 1988 году после аварии на ЧАЭС с целью контроля текущих изменений отчужденных территорий, реализации комплекса мероприятий по предотвращению выноса радионуклидов за пределы зоны отчуждения, проведения радиобиологических исследований и др.

Наряду с проблемами, имеющими отношение к радиации, в заповеднике остро стоят и другие вопросы. Динамические и эволюционные процессы, происходящие в ландшафтах, являются важным предметом современных исследований целого комплекса наук географического и биологического направлений.

Наиболее информативным приемом, позволяющим отобразить и изучить пространственную структуру земельных угодий, служит картографирование. Однако сложившаяся в Беларуси система мониторинга особо охраняемых природных территорий (ООПТ) не отвечает современным требованиям, особенно в плане оперативности и точности получаемой информации. Ситуация осложняется тем, что традиционные методы полевых исследований являются слишком материало- время- и трудозатратными. Заповедник имеет обширную территорию, абсолютно незаселенную, с труднопроходимыми болотами и лесными массивами, а также повышенным уровнем радиации.

Интенсивно развивающиеся методы цифрового картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли являются наиболее перспективными в решении данной проблемы. Преимуществом космического мониторинга данной территории является возможность получения как архивных данных значительной давности, так оперативных современных снимков. Для изучения динамики природных ландшафтов ПГРЭЗ в данном проекте использовались снимки сосъемочной системы Landsat 5 TM и Landsat 8, что позволило выявить динамику земель за период с 1986 по 2014 годы.

Тематическая цифровая обработка ДДЗ осуществлялась с помощью специализированной компьютерной программы ERDAS Imagine. Её преимущество за-

ключается в возможности предварительной и тематической обработки в одном пакете и возможности быстрого перехода от результатов обработки ДДЗ к выполнению операций средствами геоинформационных технологий.

Предварительная обработка космических снимков заключалась в атмосферной коррекции – избавлении от атмосферной дымки, для которой использовался специальный модуль Atcor. Также проводилась радиометрическая коррекция, предназначенная для исправления искажений изображения. Далее была осуществлена автоматическая классификация для предварительной оценки исследуемой территории в целях подбора оптимального количества классов. Классификация с обучением проводилась в соответствии с заданными обучающими выборками, созданными на основе эталонно-калибровочных участков (ЭКУ). Эталонные участки создаются для достоверной интерпретации многозональных космических снимков с целью четкой и корректной идентификации объекта на космическом снимке, что в конечном итоге используется для создания обучающих выборок при автоматизированной классификации космических изображений.

Пространственный сравнительный анализ полученных в результате классификации изображений проводился в программном комплексе ArcGIS 9.3. Применение геоинформационных технологий позволило систематизировать картографические и атрибутивные данные, количественную и качественную информацию, согласовать их и наложить на общую географическую основу. Результатом проведенных исследований стали тематические карты земельных угодий на территорию заповедника (рис. 1).

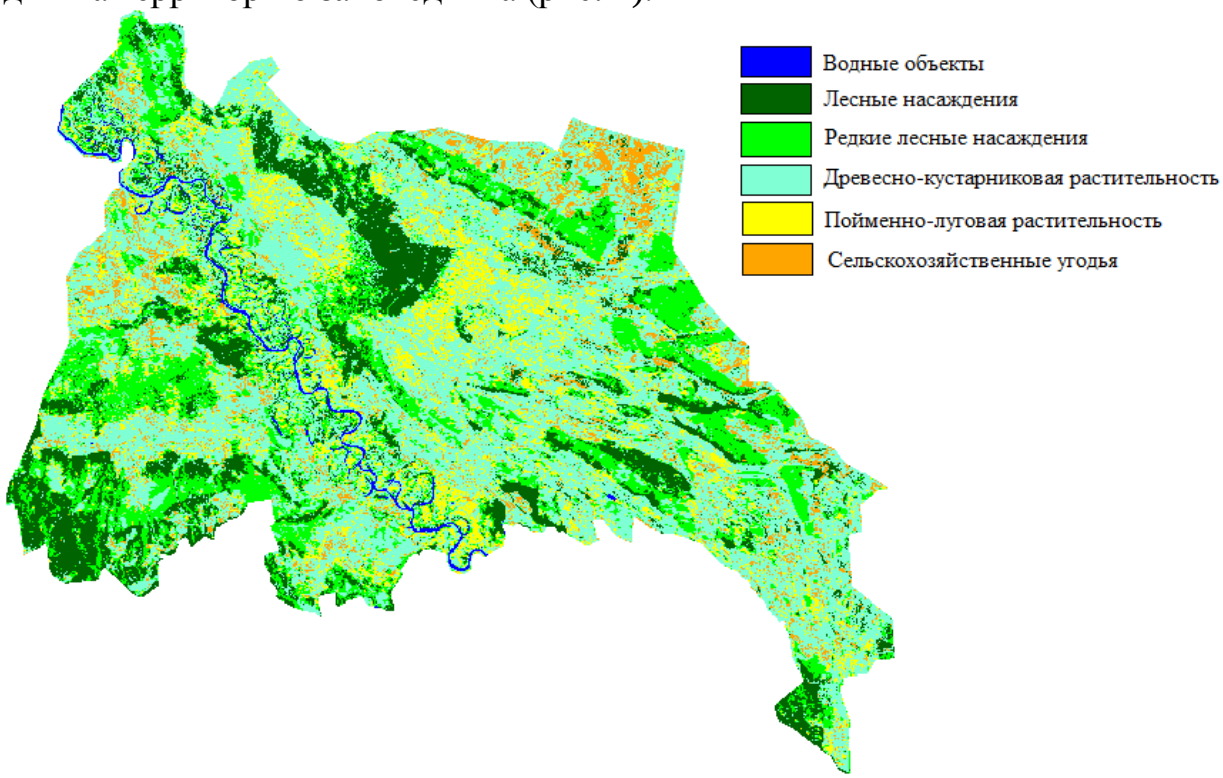


Рис. 1. Изображение, полуенное по результатам классификации космического снимка Landsat-5 TM за 1986 год

В ходе исследования на изучаемой территории в 1986 было выделено 6 классов земель, а именно: водные объекты, лесные насаждения, редколесья, земли, занятые древесно-кустарниковой и пойменно-луговой растительностью, сельскохозяйственные угодья. На снимке за 2014 год был дополнительно выделен новый класс – заболоченные земли (рис. 2).

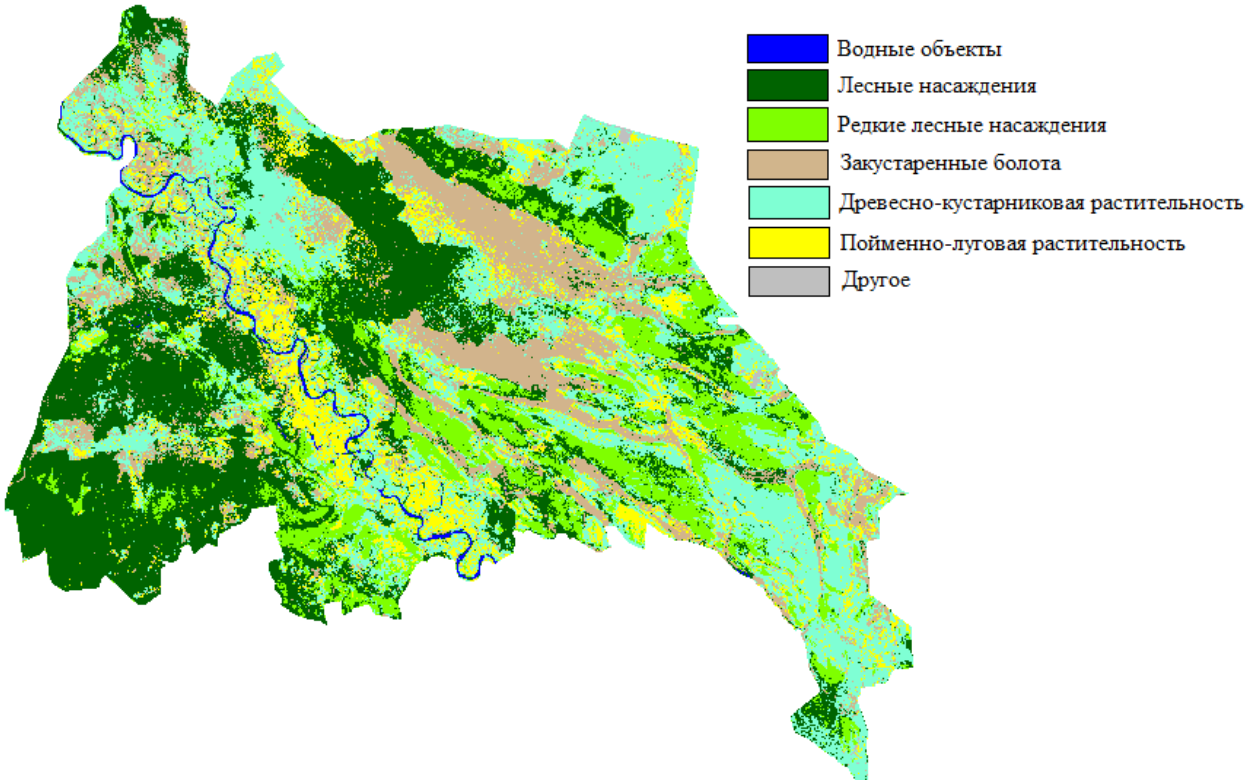


Рис. 2. Изображение, полуенное по результатам классификации космического снимка Landsat-8 за 2014 год

Анализ изображений позволил сделать выводы о том, что за период существования заповедника (более 25 лет) в структуре его земель произошли значительные изменения. В первую очередь отмечается постоянная деградация бывших сельскохозяйственных земель. Сократилась площадь пахотных и суходольных лугопастбищных угодий. Происходит постепенное зарастание кустарниковой растительностью пойменных низинных болот и пойменных лугов, что обусловлено прекращением их традиционного использования для сенокошения и выпаса скота. В результате деградации бывших мелиоративных систем развивается повторное заболачивание и подтопление земель. Эти процессы в свою очередь ведут к изменению структуры фито- и зооценозов заповедника и представляют опасность для редких видов флоры и фауны, находящихся под угрозой глобального исчезновения.

Изучение структуры и динамики земельных угодий заповедника позволит спрогнозировать характер будущих изменений и позволит проводить своевременные мероприятия по предотвращению особо негативных и опасных процессов (пожары и т.д.). Результаты, полученные за счет комплексного

использования ГИС и технологий обработки ДДЗ, позволяют разработать рекомендации по повышению эффективности (а в некоторых случаях и целесообразности) проведения тех или иных хозяйственных, природоохранных и мониторинговых мероприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования для мониторинга особо охраняемых природных территорий Беларуси [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kosmoaerogeology.by/2009-12-12-01-36-16/content/96-2009-12-28-14-36-50.

2. Лабутина, И. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Методическое пособие // И. А. Лабутина, Е. А. Балдина. – М.: WWF России, 2011. - С. 69-69.

© Е. В. Казяк, А. А. Кохно, Е. О. Хрущева, 2015

УДК 504.064

МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Ирина Германовна Ященко
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии нефти» СО РАН, 634021, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефтей», тел. (3822)49-18-11, e-mail: sric@ipc.tsc.ru

Татьяна Олеговна Перемитина
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии нефти» СО РАН, 634021, Россия, г. Томск, пр. Академический, 4, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефтей», тел: (3822)49-22-27, e-mail: pto@ipc.tsc.ru.

Для своевременной оценки экологического состояния труднодоступных болотистых территорий Западной Сибири разработана методика определения и картографирования тепловых аномалий (факелы, пожары, гари) нефтедобывающих территорий на основе спутниковых данных. Проведена оценка экологического риска воздействия сжигания попутного газа в факелах на растительный покров нефтедобывающих территорий Западной Сибири.

Ключевые слова: окружающая среда, космические снимки, месторождения нефти.

ENVIRONMENTAL MONITORING OF WEST SIBERIA OIL-PRODUCING TERRITORIES ON THE BASIS OF SPACE IMAGES

Irina G. Yashchenko
Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634021, Russia, Tomsk, 4 Akademichesky Avenue, Ph. D. in Geologyand Mineralogy, Head of the Laboratory, tel. (3822)49-18-11, e-mail: sric@ipc.tsc.ru

Tatiana O. Peremitina
Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634021, Russia, Tomsk, 4 Akademichesky Avenue, Ph. D. in Technical Science, research associate, tel. (3822)49-18-11, e-mail: pto@ipc.tsc.ru

For timely assessment of the ecological status of hard wetlands Western Siberia developed methods of measuring and mapping the thermal anomalies (torches, fires, burning) of oil-producing territories on the basis of satellite data. An assessment of environmental risk exposure to combustion gas flaring at oil-producing vegetation of Western Siberia territories was performed.

Key words: environment, satellite images, oil field.

Опасным фактором негативного воздействия нефтедобывающего комплекса на экологию Западной Сибири является химическое загрязнение атмосферы в результате сжигания попутного нефтяного газа в факелах. Россия является мировым «лидером» по факельному сжиганию попутного нефтяного газа

(ПНГ). Больше всего сжигается ПНГ в Восточной Сибири и Ханты-Мансийском автономном округе – суммарно почти 70 % всего объема факельного сжигания ПНГ в стране [1].

Некоторые негативные последствия от сжигания ПНГ для экосистем включают: сокращение лесных территорий, повышение уровня пожароопасности лесов; механическое, химическое и термическое повреждение растительности и почвенного покрова; снижение численности и видового разнообразия животных, насекомых и микроорганизмов; обеднение видового состава подроста, кустарникового, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов территорий.

Для своевременной оценки экологического состояния труднодоступных болотистых территорий Западной Сибири разработана методика определения и картографирования тепловых аномалий (факелы, пожары, гари) нефтедобывающих территорий на основе спутниковых данных. В настоящее время тепловые космические снимки (КС) широко используются для изучения тепловых полей поверхности ландшафтов в условиях антропогенного воздействия. В предложенной методике рассмотрено применение тепловых КС Landsat и продукта MODIS (MOD14A1) – данные по тепловым аномалиям) для экологического мониторинга антропогенного воздействия на территории нефтяных месторождений Ватинское, Самотлорское (Ханты-Мансийский АО) и Советского (Томская область).

В Научно-исследовательском информационном центре ИХН СО РАН сформирована коллекция КС и тематических продуктов MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения) для исследуемой территории Западной Сибири за период 2000 - 2014 гг. Тематические продукты созданы зарубежными специалистами по результатам обработки КС, полученных со спутника TERRA сканером MODIS и цифровых моделей рельефа. Материалы съёмки MODIS имеют широкий спектр применения для исследования атмосферы, водных объектов и суши [2]. Данные MODIS по всей поверхности Земли поступают со спутника Terra каждые 2 дня в 36 спектральных зонах с разрешением 250-1000 м, что обеспечивает моделирование в глобальном и региональном масштабе. Предназначение системы MODIS состоит в сборе данных для калиброванных глобальных интерактивных моделей Земли как единой системы.

Для выделения высокотемпературных участков на КС Landsat в среде ERDAS Imagine проводилось: 1) пересчет исходных значений пикселей в реальные значения приходящего излучения на сенсоре; 2) пересчет значений излучения на сенсоре в значения температуры; 3) выявление участков с температурой выше порогового значения. Пороговое значение температуры выбрано на основе значений температуры воздуха приземного слоя, которая в сентябре 1999 г. составляла +17 ° С, в июле 2007 г. составила +21° С [3].

Продукты MOD14A1 группы «Тепловые аномалии/Пожары» позволяют обнаружить очаги с высокой интенсивностью горения [2]. Принцип определения площадей пожаров основан на их сильном излучении в среднем инфра-

красном диапазоне. На рис. 1 приведен результат применения разработанной методики определения и картографирования участков с высокими значениями температуры поверхности исследуемых территорий. Высокие значения температуры по КС Landsat отмечены на участках с факельными установками и на территории с городской застройкой. Как следует из рис. 1, зелеными и красными точками отмечены горящие факела на территории Советского, Самотлорского и Ватинского месторождений. Совмещение зеленых и красных точек указывает на длительное горение факелов в период 1999-2007 гг. По КС Landsat в 2007 г. на Ватинском месторождении выявлено 176 высокотемпературных участков, на Самотлорском месторождении - 390, на Советском - 22. В 2012 г. по данным MOD14A1 на территории Самотлорского месторождения численность горящих факелов составила 136, на Советском и Ватинском месторождениях снизилась до 7 и 1 соответственно [4].

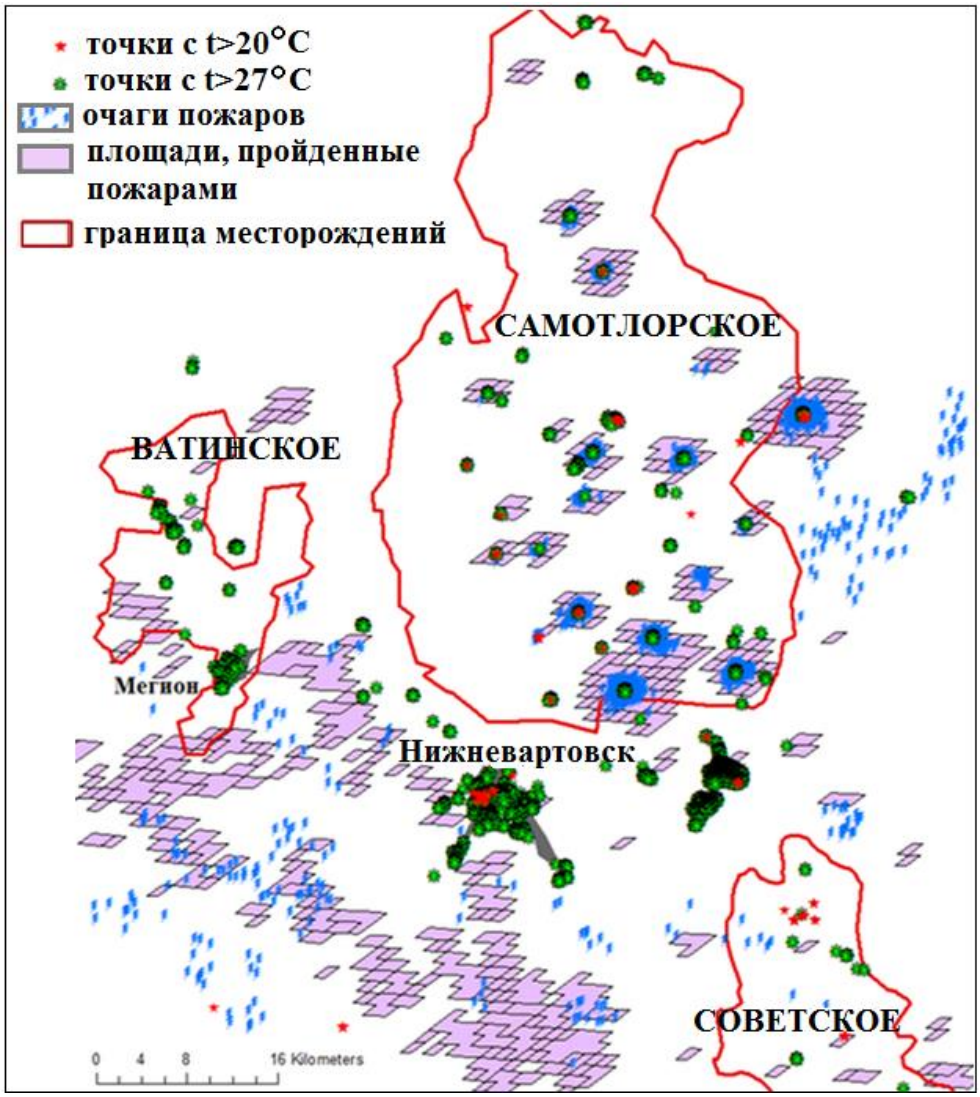


Рис. 1. Участки и точки с аномальными значениями температуры

Известно, что радиус прямого термического повреждения растительности для факела малой мощности составляет до 50 м, с большей мощностью – до 200 м. Последствия угнетения растительности только за счет теплового излучения наблюдаются на расстоянии до 4 км и более. Значительное негативное действие на растительность оказывают пожары, риск возникновения которых существенно повышается на нефтедобывающих территориях с действующими факельными установками. По данным MOD14A1 [14] на рис. 1 приведены участки гарей за 2000 - 2010 гг. и очаги пожаров за 2007 и 2012 гг. Как видно из рис. 1, на Самотлорском месторождении отмечены большие площади как старых пожаров, так и более современных.

Основу ПНГ составляет смесь легких углеводородов, включающая метан, этан, пропан, бутан, изобутан и другие углеводороды, которые под давлением растворены в нефти. Состав ПНГ может значительно варьироваться в зависимости от территории добычи, а также от свойств конкретного месторождения. Основными химическими веществами, выбрасываемыми в атмосферу при сжигании попутного газа в факелах, являются сажа, оксид углерода (CO_2)
и диоксид азота (NO_2). Известно, что некоторые виды растений оказываются более чувствительными к воздействию вредных факторов, чем человек. Таксономические группы растений по степени чувствительности к воздействию фитотоксичных газов располагаются в следующем порядке: мхи, лишайники и грибы; хвойные древесные породы; лиственные древесные породы; травянистые растения. Чем выше чувствительность, тем меньшие концентрации загрязняющих веществ вызывают повреждения соответствующих видов растительности. В соответствии с коэффициентом чувствительности для каждой группы растительных сообществ выбираются зоны с определенным уровнем загрязнения атмосферы. Например, для лесных комплексов с преобладанием хвойной растительности получено [5]:

- неприемлемый уровень риска - в зоне с уровнем загрязнения >1 ПДК;
- приемлемый – в зоне с уровнем загрязнения от 1 до 0,5 ПДК;
- пренебрежимый - в зоне с уровнем загрязнения от 0,5 до 0,025 ПДК.

Картографирование экологических рисков реализовано средствами геоинформационной системы (ГИС) ArcGIS и состоит из следующих этапов:

1. кластеризация и векторизация мультиспектрального космического снимка и создание тематического векторного слоя пространственной структуры растительного покрова;
2. построение векторных слоев цифровой карты, содержащих зоны с разными уровнями загрязнения атмосферы в долях от ПДК соответствующего загрязняющего вещества для человека;
3. выбор зоны загрязнения атмосферы для каждого типа растительности с уровнями загрязнения в зависимости от чувствительности соответствующего типа растительности;
4. построение итоговой карты зон экологического риска.

Таким образом, рассмотрены негативные последствия от сжигания ПНГ для экосистемы Западной Сибири. Представлено применение тепловых космических снимков Landsat и продуктов MODIS для картографирования аномальных тепловых полей поверхности ландшафта для определения местоположения действующих факелов и площадей пожаров. Разработана методика расчета уровня риска антропогенного влияния действующих факелов на растительный покров. Картографирование и пространственный анализ труднодоступной болотистой местности нефтедобывающих территорий Западной Сибири могут оказать значительную помощь в своевременной оценке экологической ситуации и принятии решений в устранении и профилактики загрязнения окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экологический мониторинг: Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе-Югре в 2012 году.– Ханты-Мансийск, 2013. – 172 с.

2. Данные по тепловым аномалиям MOD14A1, описание и получение [Электронный ресурс]: данные. Режим доступа: http://gis-lab.info/qa/mod14a1.html

3. Дневник погоды [Электронный ресурс]: данные. Режим доступа: http://www.gismeteo.ru/diary/3974/1999/9/.

4. Алексеева М. Н., Ященко И. Г., Перемитина Т.О. Оценка состояния и динамики восстановления растительного покрова нефтедобывающих территорий с использованием космических снимков // Нефть. Газ. Новации. – 2013. – № 10 (177). – С. 16-19.

5. Природные ресурсы Томской области /Дюкарев А. Г., Львов Ю. А., Хмелев А. А. и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991.–176 с.

© И. Г. Ященко, Т. О. Перемитина, 2015

УДК 519

ИСХОДНЫЕ КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИ СОЗДАНИИ КАРТ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛАНДШАФТЫ

Юлия Григорьевна Никитина
Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, аспирант кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (3952)40-51-02, e-mail: yul-nikitina@mail.ru

Виктор Евгеньевич Гагин
Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, e-mail: victor_gagin@mail.ru

В статье представлен весь спектр необходимых исходных картографических материалов при создании карт антропогенного воздействия на ландшафты. Также дана подробная характеристика каждого из них с подробным перечнем требующихся экологических показателей всех видов антропогенного воздействия.

Ключевые слова: исходные картографические материалы, антропогенное воздействие, справочно-статистические, картографические и литературные материалы, материалы полевых исследований и ДЗЗ.

ORIGINAL CARTOGRAPHIC MATERIALS TO CREATE MAPS OF MAN IMPACT ON LANDSCAPES

Yulia G. Nikitina
National Research Irkutsk State Technical University, 664074, Russia, Irkutsk, 83 Lermontov St., post-graduate student, department of mine surveying and geodesy, tel. (3952)40-51-02, e-mail: yul-nikitina@mail.ru

Victor E. Gagin
Irkutsk state University of railway engineering, 664074, Russia, Irkutsk, 15 Chernyshevsky, candidate of technical Sciences, senior lecturer of the Department of construction of Railways, bridges and tunnels, e-mail: victor_gagin@mail.ru

The article presents the entire range of the original maps to create maps of man impact on the landscape. Also this paper gives a detailed description of each of them with a detailed list of required environmental performance of all types of man impact.

Key words: original cartographic materials, man impact; information and statistics, cartographic and literary materials, materials, field studies and remote sensing.

На сегодняшний день, в эпоху активного природопользования существует необходимость проводить оценку и мониторинг состояния природной среды в целях обнаружения и прогнозирования негативных изменений ландшафтов и их компонентов. Использование картографического подхода с помощью данных ДЗЗ для наиболее эффективного решения данной проблемы позволяет получить наглядное высокоинформативное, объективное отображение геоэкологического состояния природных комплексов в прошлом, настоящем и будущем [3].

Для достоверной и всесторонней оценки антропогенного воздействия необходимо привлечение обширного спектра источников информации, включающего практически все типы, виды и способы получения исходных данных. Наибольшие ценность и класс достоверности (1 класс) представляют первичные источники информации, полученные полевыми, дистанционными методами, далее – вторичные (полученные на основе первичных источников или имеют описательный характер) – справочно-статистические, картографические и литературные.

1. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – любое изучение объекта, осуществляемое на расстоянии, без непосредственного контакта, основанное на использовании электромагнитных излучений, исходящих от объекта исследования [1]. Наибольшее применение среди дистанционных методов получили аэро- и космоснимки, созданные с помощью специальной аппаратуры (фотокамеры, сканеры, радиолокаторы), установленной на специальных летательных объектах (самолёты, вертолёты, космические спутники Земли).

Материалы космических съёмок предоставляют ценнейшую информацию для экологического исследования и картографирования территории [2]:

- Космические снимки, в отличие от аэроснимков, обеспечивают гораздо больший охват территории, что способствует изучению региональных и глобальных явлений и закономерностей на планете.
- Другим важным преимуществом космоснимков признано совместное отображение всех компонентов геосферы, что позволяет использовать индикационное дешифрирование при выявлении и оценке экологических условий территории, основанное на взаимосвязях и взаимовлияниях друг на друга компонентов среды. С другой стороны, эта особенность космических изображений с успехом применяется для разноплановых отраслевого тематического и комплексного картографирования.
- Также космические методы обладают преимуществом регулярности одной и той же съёмочной аппаратурой повторных съёмок различного интервала: годы, месяцы, дни, часы, минуты, что особенно значимо для изучения динамики объектов и явлений.
- Наконец, космоснимки представляют собой модель местности, в т.ч. ландшафтную структуру территории.
- Необходимо также отметить, что снимки с космических аппаратов значительно увеличивают эффективность технологических процессов картографирования, а именно: сокращают сроки сбора информации, подготовительных работ, облегчают согласование карт.

На снимках при визуальном дешифрировании хорошо передаются многие виды антропогенного воздействия. По прямым признакам дешифрируются места открытой добычи полезных ископаемых, подземной – по косвенным признакам (отвалы, просадки, инфраструктурная сеть). Воздействие от обрабатывающей промышленности проявляется через загрязнение воздуха (на снимках хорошо видны дымовые шлейфы, смог, загрязнение снежного покрова, деградация растительности), поверхностных вод (тепловое, химическое, механиче-

ское загрязнение). Скорость застройки городских, пригородных и рекреационных зон также находят отображение на снимках и могут быть количественно определены. Сельскохозяйственная деятельность выявляется по распаханности территории, степени пастбищного и сенокосного использования и изменениям, к которым они приводят: водная и ветровая эрозия, деградация почвенно-растительного покрова, дегумификация почв. Определяются на снимках и нарушения растительности: опустынивание, вырубки, следы пожаров, смена коренных пород, паталогии и др. [1].

Для более точной фиксации произошедших изменений используются автоматизированные разновременные композиты космических снимков, методика создания которых также изложена в работе [3,4]. На созданных разновременных композитах все изменения достаточно чётко определены: зелёный цвет показывает исчезнувшие объекты, а розовый – наоборот, появившиеся на более позднем снимке.

2. К документальным исходным материалам можно отнести картографические, литературные, справочно-статистические источники.

При создании различных карт экологической направленности требуется большой объём справочно-статистической информации.

Прежде всего, необходимы данные по численности жителей всех населённых пунктов. Искомая информация предоставляется в официальных отчётах по проводимым в стране переписям населения, результаты которых доступны в органах Государственной статистики «Росстат» и её региональных отделениях, в т.ч. на их официальных сайтах. Также региональными государственными органами ЗАГСа осуществляются промежуточные ежегодные подсчёты по численности населения, как правило, на 1 января каждого года.

Кроме этого, в органах Государственной статистики «Росстат» и её региональных отделениях можно найти сведения о занятости жителей в определённых отраслях экономики, что предоставляет картографам информацию о существующих на картографируемой территории типах природопользования.

Следующими необходимыми данными считаются характеристика и показатели типов антропогенного воздействия.

При рекреационном воздействии важным показателем является количество отдыхающих на единице площади в единицу времени или количество турбаз, дающих представление о возможном количестве рекреантов.

К объектам лесохозяйственного воздействия относятся участки горелого леса (гари) и вырубки. В различного рода экологических сборниках и отчётах приводится информация об объёмах, площади и возрасте нарушенных данным образом лесных массивов.

Подобные же показатели необходимо получить и о сельскохозяйственном воздействии в виде распаханных земель, сенокосов и пастбищ. Также совершенно необходима количественная и качественная информация об хранении и использовании на распаханных землях химикатов, поголовью скота, экологическом состоянии земельных ресурсов.

В случае горнопромышленного воздействия важны показатели объёмов и площади нарушенных горных пород, а при воздействии обрабатывающей промышленности и жилищно-коммунальных предприятий в населённых пунктах необходимы сведения об объёмах сбросов и выбросов вредных веществ с промышленных предприятий, а также направлений их дальнейшего распространения в ландшафте, уровнем шумового и теплового загрязнения.

Транспортное воздействие характеризуется также объёмами и структурой сбросов и выбросов вредных загрязняющих веществ, также направлений их дальнейшего распространения в ландшафте, уровнем шумового и теплового загрязнения, а в случае воздействия от железнодорожного транспорта и линий электропередач – уровень электромагнитного загрязнения.

Информация о водохозяйственном воздействии имеет значение только, если на данной территории были созданы искусственные водоёмы, к примеру, водохранилище. Тогда интерес представляют значения площади затопляемых земель, длины береговой линии и разница уровня воды.

Аналогичным образом, это касается и природоохранного воздействия при наличии различных категорий особо охраняемых природных территорий. В данной ситуации будут значимы все перечисленные выше показатели, но имеющие направленность в сторону уменьшения их величины, характеризующие эффективность природоохранных мероприятий.

Для сбора дополнительных данных по антропогенному воздействию потребуются созданные ранее различные отраслевые и экологические карты, содержащие необходимую экологическую информацию.

Также для формирования общегеографической и ландшафтной основ к картам антропогенного воздействия необходимо использовать цифровые топографические и ландшафтные карты данной территории соответственно. Цифровая топографическая карта должна иметь вид (или переведена) в те проекции и масштаб, что и планируемая карта. С топографической карты на тематическую переносятся вся гидрографическая, дорожная и селитебная сети, рельеф, линии электропередач и связи, в некоторых случаях промышленные объекты. В качестве ландшафтной основы принимается имеющаяся на данную территорию готовая ландшафтная карта, с которой без изменений извлекаются взаимное расположение ландшафтных выделов, их классификация и иерархия, а также принятая система условных знаков (цветовая гамма).

В качестве литературных материалов используются различного рода научные труды по теме антропогенного воздействия на ландшафты: диссертации, авторефераты, монографии, учебные пособия, научные статьи и тезисы. Не маловажную роль играют также и СМИ: телевидение, интернет-сайты, пресса, – часто именно они предоставляют наиболее «свежую» экологическую информацию, но эти сведения должны иметь определённую степень достоверности и обязательно быть проверенны.

3. Для подтверждения и детального изучения всех вышеперечисленных показателей необходимы результаты полевых исследований, включающих три этапа: подготовительный, полевой и предварительную полевую обработку результатов.

На подготовительном этапе происходит оценка территории исследования с точки зрения выявления локальных участков антропогенного воздействия. Здесь анализируются перечисленные выше источники (вплоть до прессы) и т.п., а так же составляются оптимальные маршруты движения по эталонным участкам. Эталонные участки характеризуются теми местностями, где наиболее активно развита человеческая деятельность. Маршруты движения намечаются на среднемасштабных топографических картах, и заносятся в портативные GPS навигаторы.

Комплекс работ полевого этапа включает в себя непосредственное координирование эталонных участок портативными GPS приемниками, заполнение журнала обследования (табл.), фотофиксацию объектов, а так же при необходимости отбор проб (воды, воздуха, грунта и т.п.). Пробы необходимы для получения качественных и количественных характеристик элементов природной среды в результате лабораторных исследований, с целью внесения этих данных в общую базу данных ГИС.

Таблица

Образец таблицы записей в журнале полевых исследований

№ участка	Наименование участка	Дата	№ фото	Координаты участка	Описание участка (визуальная характеристика)	№ пробы	Прочее

Полевая обработка результатов включает в себя предварительный ГИС-анализ результатов выбранных эталонных участков, что позволяет оценить «правильность» выбранных эталонных участков и возможно выявить новые территории, где необходимы полевые исследования.

Таким образом, все виды материалов, описанных выше, представляют собой полный комплекс картографической продукции, необходимый для составления экологических карт. Картографическая интерпретация хозяйственной деятельности человека позволит проводить анализ этих территорий в целях рационального природопользования и сохранения природных ландшафтов, подверженных антропогенному воздействию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Книжников Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. / Ю. Ф. Книжников В.И., Кравцова О. В., Тутубалина. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. 336 с.

2. Кравцова В. И. Космические методы картографирования / Под ред. Ю. Ф. Книжникова. – М.: Изд-во МГУ, 1995. 240 с.

3. Олзоев Б. Н., Никитина Ю. Г. Геоинформационное картографирование антропогенного воздействия с использованием разновременных космических снимков на примере Прибайкальского национального парка // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 237–242.

4. Олзоев Б. Н., Никитина Ю. Г. Изучение антропогенной трансформации ландшафтов Прибайкалья по космическим снимкам (на примере острова Ольхон) // Вестник Иркутского государственного технического университета. Иркутск: 2014. Т. 85. № 2. С. 67-74.

© *Ю. Г. Никитина, В. Е. Гагин, 2015*

УДК 551.507+551.79 +551.31+55(235.222)

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ДЛЯ НЕКОТОРЫХ РАЙОНОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Элеонора Ринатовна Семакова
Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Узбекистана, 100052, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Астрономическая 33, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, тел. (998)71-235-81-02, e-mail: ella@astrin.uz

Представлены результаты интерферометрической обработки данных TanDEM-X с использованием модуля SARscape 5.1 программного обеспечения ENVI 5.2 для построения цифровой модели рельефа некоторых горных районов Центрального и Западного Тянь-Шаня.

Ключевые слова: ЦМР, данные TanDEM-X, горные районы, интерферометрическая обработка, SARscape, оценка точности.

PRELIMINARY RESULTS OF THE DIGITAL ELEVATION MODELS GENERATION FOR SOME AREAS OF CENTRAL AND WESTERN TIEN-SHAN

Eleonora R. Semakova
Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences, 100052, Uzbekistan, Tashkent, 33 Astronomicheskaya St., Ph. D., senior scientific researcher, tel. (998)71-235-81-02, e-mail: ella@astrin.uz

The results of TanDEM-X data interferometric processing using the SARscape 5.1 Module in ENVI 5.2 software for generation of a digital elevation model for some mountain areas of Central and Western Tien- Shan are presented.

Key words: DEM, TanDEM-X data, mountain regions, interferometric processing, SARscape, accuracy evaluation.

Цифровые модели рельефа играют важную роль в различных геонаучных исследованиях: в гидрологии, гляциологии, лесоводстве, геологии, океанологии и исследованиях окружающей среды. Целью данной работы является построение современных цифровых моделей рельефа некоторых участков горной местности с целью их использования для изучения состояния природных объектов в горных районах Центральной Азии (ледники, озера, сели, оползни, лавины), что является актуальным исследованием для Республики Узбекистан.

Деградация оледенения на современном этапе в Узбекистане характеризуется отступанием ледников и образованием большого количества приледниковых и моренных озер [1]. Смещение гравитационно-моренного материала со-

здаёт потенциальную угрозу формирования катастрофических гляциальных селей [2]. Кроме того, участившиеся случаи сошедших оползней и горных обвалов ведут к образованию завальных озер, которые также могут быть прорывоопасными.

Наземные исследования опасных гляциальных процессов в высокогорье в настоящее время проводятся в основном на локальных территориях с ограниченным периодом наблюдений.

Дистанционные исследования позволяют эффективно и широкомасштабно контролировать состояние природных объектов и прогнозировать возможности их неожиданного проявления. Дальнейшие работы будут связаны с совместным использованием оптических и радиолокационных данных и применением разработанных в республике и за рубежом моделей формирования и движения опасных природных объектов. На данном этапе предполагается создать цифровые модели рельефа (ЦМР) для района с активным проявлением таких геофизических процессов, как снежные лавины, сели и оползни, а также для районов с развитым оледенением и наличием высокогорных озер. В рамках стажировки DAAD в институте GFZ по изучению интерферометрической обработки данных TerraSAR-X и TanDEM-X с использованием программного модуля SARscape 5.1 построены предварительные ЦМР на примере района ледника Иныльчек (Центральный Тянь-Шань) и двух районов Западного Тянь-Шаня.

Как известно, система TanDEM-X служит дополнением к системе TerraSAR-X и предназначена для измерения высот на земной поверхности с абсолютной точностью по высоте 10 м, относительной – 4 м для горных районов и точностью в плоскости – 12 м [3]. Интерферометрические пары радиолокационных снимков, полученных этими сенсорами, отличаются более высокой когерентностью по сравнению с данными других сенсоров благодаря геометрической точности датчиков и одновременностью съемки (отсутствуют временная декорреляция и атмосферные эффекты, свойственные для сенсоров с повторной съемкой).

Тип исходных данных: SSC – комплексные радиолокационные изображения с амплитудно-фазовыми параметрами в геометрии наклонной дальности, HH- поляризации, SM – полосного режима съемки, восходящего витка орбиты для ледниковых районов (по 2 пары с перекрытием) и нисходящего – для района с лавинно-селевой опасностью (1 пара) зимнего периода съемки.

Ледник Иныльчек делится на Северный и Южный. Последний является самым крупным ледником Тянь-Шаня и имеет длину около 60 км. В месте соединения Северного и Южного Иныльчека лежит ледниково-подпрудное озеро Мерцбахера, которое ежегодно прорывается в долину реки Иныльчек по подледным каналам. Покрытие данными TanDEM-X этого района охватывает высоты до 6500 м.

Второй ледниковый район включает ледники некрупных размеров (до 3 км^2) в верховьях рек Ойгаинг и Майдантал, притоков реки Пскем (Западный Тянь-Шань) с высотами до 4500 м.

Сцена третьего района исследований с активными склоновыми процессами (район перевала Камчик, Западный Тянь-Шань) охватывает высоты до 3700 м.

Технология обработки данных включала все этапы работы в модуле SARscape от создания интерферограммы до конвертации разности фаз в абсолютные значения высоты местности и геокодирования [4].

Отличием в обработке тандемных данных такого режима съемки являлось то, что не было необходимости учитывать настройки корегистрации снимков (“Skip for Tandem Bistatic Data”) и проводить калибровку орбиты с помощью наземных опорных точек (процедура Refinement and Re-flattening), поскольку развернутая фаза являлась автоматически откорректированной.

Особое внимание уделялось выбору подходящего адаптивного фильтра для устранения фазового шума на интерферограмме, метода развертки фазы и порога когерентности. В качестве опорной модели рельефа в процессе создания интерферограммы использовалась глобальная ЦМР С-диапазона системы SRTM.

Анализу подвергались разности цифровых моделей рельефа, полученных: одним фильтром и двумя методами развертки фаз, одним методом развертки и двумя фильтрами, разными порогами когерентности, разности с SRTM. При этом оценивалось качество: интерферограммы до фильтрации и после, чтобы исключить потери топографической информации на крутых склонах; изображений развернутой фазы в выбранных районах и ее непрерывность по заданным профилям; значений когерентности фаз по полю снимка; вида продольных и поперечных профилей разности ЦМР. Для устранения ошибок в местах разрыва фазы или ее скачков, возникновение которых характерно в различной степени для любых горных территорий, были предприняты попытки редактирования развернутой фазы или маскирования таких областей, чтобы они не участвовали в дальнейшем процессе. Предполагалось затем использовать различные методы интерполяции с соседних областей, чтобы «залить» образовавшиеся пустоты в ЦМР.

Результаты сильно отличались друг от друга в зависимости от используемых алгоритмов фильтра и разверстки фазы и параметров их настройки, поэтому сложно было выбрать один результат в качестве наилучшего. Для района ледника Иныльчек, к примеру, минимальная разность между двумя ЦМР оказалась в случае использования одного метода развертки фазы Region Growing и двух фильтров - Goldstein и Adaptive Window. Наивысшие значения когерентности выявлены на теле ледника, однако окружающие ледник территории имели очень низкие значения когерентности при любом выборе фильтра.

С использованием второй тандемной пары (разница дат съемки составляла 11 дней), были рассмотрены те же алгоритмы обработки для оценки соответствия ЦМР друг другу. Среднее значение разности ЦМР двух пар в области перекрытия изменялось от 12 до 14 м при стандартном отклонении (σ) от 16 до 18 м. Чтобы исключить возможную сдвижку между ними, проводились экспери-

менты по привязке одной ЦМР к другой, однако это не привело к улучшению результатов.

Цифровая модель рельефа верховьев реки Ойгаинг получена с теми же параметрами, чтобы сравнить ее с ЦМР, построенной по данным LOS/PALSAR [4]. Тренд профилей, созданных по разности двух ЦМР, приближался к нулю. Значения когерентности для данных TanDEM-X по всему полю изображения были выше, чем для данных ALOS / PALSAR.

Для сравнения ЦМР с SRTM, данные были предварительно преобразованы в ту же проекцию и с тем же разрешением, что и данные TanDEM-X. Среднее значение их разности по высоте оказалось равным 25 м, $\sigma = 26$ м.

Для анализа сопоставимости ЦМР в области перекрытия с ЦМР второй пары (разность дат съемок составляла 3 зимних месяца), проведены эксперименты с подбором порогов когерентности на этапах развертки фазы и генерации финального продукта. Поскольку использование интерполяционных методов для избавления пустот в ЦМР возможно только для небольших зон, где нет резких морфологических изменений, то для сравнения ЦМР двух пар в области перекрытия использовались одни и те же значения порогов когерентности.

Различие в высотах в области перекрытия возможно вызвано атмосферным эффектом. За период между датами съемок могли произойти изменения, связанные с обильным выпадением твердых осадков, характерным в это время. Также проявлялся эффект “наложения” (layover) и теней, свойственный горным районам. При наличии данных нисходящего витка орбиты на периоды максимальной абляции ледников возможно удастся минимизировать их влияние.

Сравнение построенной ЦМР третьего района исследований с SRTM показало систематическую сдвижку в 19 м (σ=9м).

Отметим практически полное отсутствие растительности в районах исследования, лишь в последнем районе встречаются редкие арчевые деревья и кустарники.

Выделив небольшую область и проведя морфологический анализ с расчетом крутизны и экспозиции склонов, высотных контуров, речной сети и водосборов, в которых проводятся специализированные снеголавинные наблюдения, появилась возможность сравнения с такими же расчетами по ЦМР (Topo), построенной ранее по топографической картосхеме [5].

Речная сеть совпадает по всем трем моделям рельефа, что подтверждает отсутствие горизонтальных смещений между ними. Совпадение имеется также между горизонтали SRTM и Topo. Несовпадение с горизонталями TanDEM-X говорит о вертикальном смещении этой ЦМР относительно SRTM и Topo. Совместный анализ значений разности между ЦМР и SRTM и грида экспозиции выявил, что наибольшие значения разности попадают на склоны западной экспозиции, минимальные значения в пределах точности (от -10 до +10 м) на склоны восточной экспозиции. Поскольку съемка проходила с нисходящего витка орбиты и правосторонним обзором, искажения, свойственные радиолокацион-

ной съемке горных территорий, минимально проявлялись на склонах восточной экспозиции.

Аналогично, ЦМР второго района исследований минимально смещена на склонах западной экспозиции при восходящем витке орбиты, однако наличие неопределенностей в местах с низкой когерентностью не позволяет дать более точную оценку. В дальнейшем предполагается использовать методику [6] для устранения смещений между ЦМР в задачах определения изменения высоты ледников с 2000 г.

Благодарности

Автор выражает благодарность Германской службе академических обменов DAAD за предоставленную возможность стажировки в Научно-исследовательском Центре по наукам о Земле (GFZ, г. Потсдам, Германия) и сотрудникам секции ДЗЗ отдела ДЗЗ и Геодезии GFZ за предоставленные данные, программное обеспечение и полезные советы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семакова Э. Р., Семаков Д. Г. Определение гляциальных объектов в высокогорных районах Республики Узбекистан // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 35–40.

2. Отступание ледников - фактор возникновения гляциальных селей / И. Г. Томашевская, А. А. Тихановская, М. А. Петров // Криосфера Земли. – 2013.–Т. XVII. – Вып. 4. – С. 83-86.

3. TanDEM-X Science Plan, https://tandemx-science.dlr.de/pdfs/TD-GS-PL-0069-TanDEM-X-Science-Plan_V1_300610.pdf (accessed on 6 December 2010).

4. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных ALOS PALSAR / Ю. Б. Баранов, Ю. И. Кантемиров, Е. В. Киселевский, М. А. Болсуновский // Геопрофи. – 2008. – Вып. 2. – С. 19-23.

5. Semakova E. ALOS/PALSAR applications in glaciological studies / Report on the “Microwave Remote Sensing and its Applications” Course, 5-30 May, 2014, IIRS, Dehradun, India.

6. Индикационные показатели климата и рельефа, определяющие снеголавинный режим района перевала Камчик / Э. Р. Семакова, С. В. Карандаев, Ю. А. Тарасов // Труды НИГМИ. – 2010. – Вып. 16(261). – С. 96-102.

7. Nuth C., Kaab A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change // The Cryosphere. – 2011. - V. 5, p. 271–290.

© Э. Р. Семакова, 2015

УДК 556.044 + 504.4

МОНИТОРИНГ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПАВОДКОВОЙ СИТУАЦИИ В СИБИРСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Валерий Николаевич Антонов
СЦ ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, директор, тел. (383)222-33-07; e-mail: avn@rcpod.siberia.net, www.rcpod.ru

Оксана Геннадьевна Новгородцева
СЦ ФГБУ «НИЦ "Планета"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, младший научный сотрудник, тел. (383)334-45-42; e-mail: novg-oksana@yandex.ru

В статье рассмотрена актуальность проблемы паводковой ситуации, а так же цифровые технологии обработки многоспектральных данных, применяемые при оперативной работе в Сибирском Центре «НИЦ "Планета"». Карты паводковой обстановки являются в достаточной степени информативными и служат одним из основных источников информации для региональных служб МЧС для оценки ситуации и принятия решений.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, картографирование, технология, уровень воды.

MONITORING AND MAPPING OF FLOOD SITUATION IN THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT

Valeriy N. Antonov
State Research Center «Planeta» – Novosibirsk, 630099, Russia, Novosibirsk, 30 Soviet St., Director, tel. (383)222-33-07; e-mail: avn@rcpod.siberia.net, www.rcpod.ru

Oksana G. Novgorodtseva
State Research Center «Planeta» – Novosibirsk, 630099, Russia, Novosibirsk, 30 Soviet St., Junior research fellow, tel. (383)334-45-42; e-mail: novg-oksana@yandex.ru

The article describes the importance of the problem of flood situation and digital processing technology of multispectral data, used in the operational work in State Research Center «Planeta». The flood maps are informative enough to serve as one of the main sources of information for the regional services of the Ministry for Emergency Situation.

Key words: remote sensing, mapping, technology, water level.

В зону ответственности СЦ "НИЦ "Планета" попадают два крупнейших речных бассейна - Оби и Енисея. Паводковая обстановка на реках Сибирского Федерального Округа (СФО) по сей день является одной из наиболее острых проблем требующей постоянного оперативного мониторинга. В бассейнах рек СФО уровень воды в период весеннего половодья и в период дождевых паводков часто превышает расчетный уровень критических отметок подъема воды, что приводит к подтоплению не только пойменных и садовых участков, но и населенных пунктов [1].

В период с конца мая по конец июня этого года, на территории Верхней Оби и ее притоках наблюдались превышения уровней воды над нормой на не-

сколько метров, что привело к стихийному бедствию по масштабу и интенсивности воздействия на инфраструктуру и население в размерах, которые ранее не отмечались за всю историю Алтайского края. Причиной наводнения стали дожди, обрушившиеся на Республику Алтай. Началось стремительное повышение уровня воды рек Бии, Катуни и Чарыша. Сложившаяся чрезвычайная ситуация в регионе привела к затоплению десятков деревень, тысяч домов, разрушению дорог и прочих коммуникаций, в следствие чего погибли 6 человек, более 40 тысяч жителей эвакуированы. По данным штаба по ликвидации последствий паводка, ущерб от наводнения 2014 года в Алтайском крае и Республике Алтай составил 6,5 миллиардов рублей (рис. 1, 2).

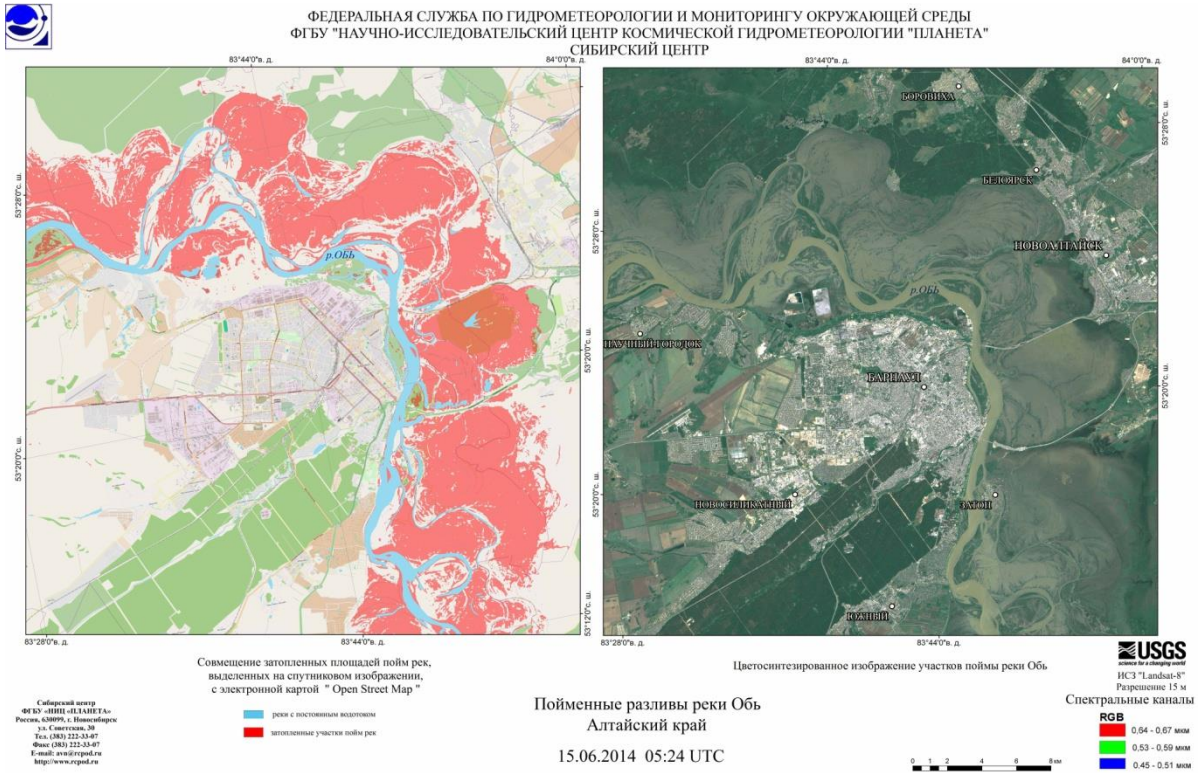


Рис. 1. Паводковая ситуация в районе города Барнаул

Таким образом, целью работы в первую очередь является оперативный спутниковый мониторинг паводковой обстановки, а так же накопление статистических данных для дальнейшего прогнозирования паводковой ситуации.

Мониторинг чрезвычайных ситуаций связанный с паводковой обстановкой, можно условно разделить на оперативный, и пространственно-временной. Первый ориентирован на быстрое обнаружение зон подтопления, определение их характеристик и оперативную передачу информации структурам МЧС Сибирского Федерального Округа, подразделениям Росгидромета, Верхне-Обскому бассейновому водному управлению для оценки ситуации и принятия управленческих решений. Результаты пространственно-временного мониторинга представляют собой обобщенную характеристику чрезвычайных ситуаций, зафиксированных на контролируемой территории за определенный период времени (неделя, декада, месяц и т.д.). По мере накопления информации формируются вре-

менные ряды результатов космического мониторинга (рис. 3), на основе анализа которых определяется частота попадания территории в зоны затопления.

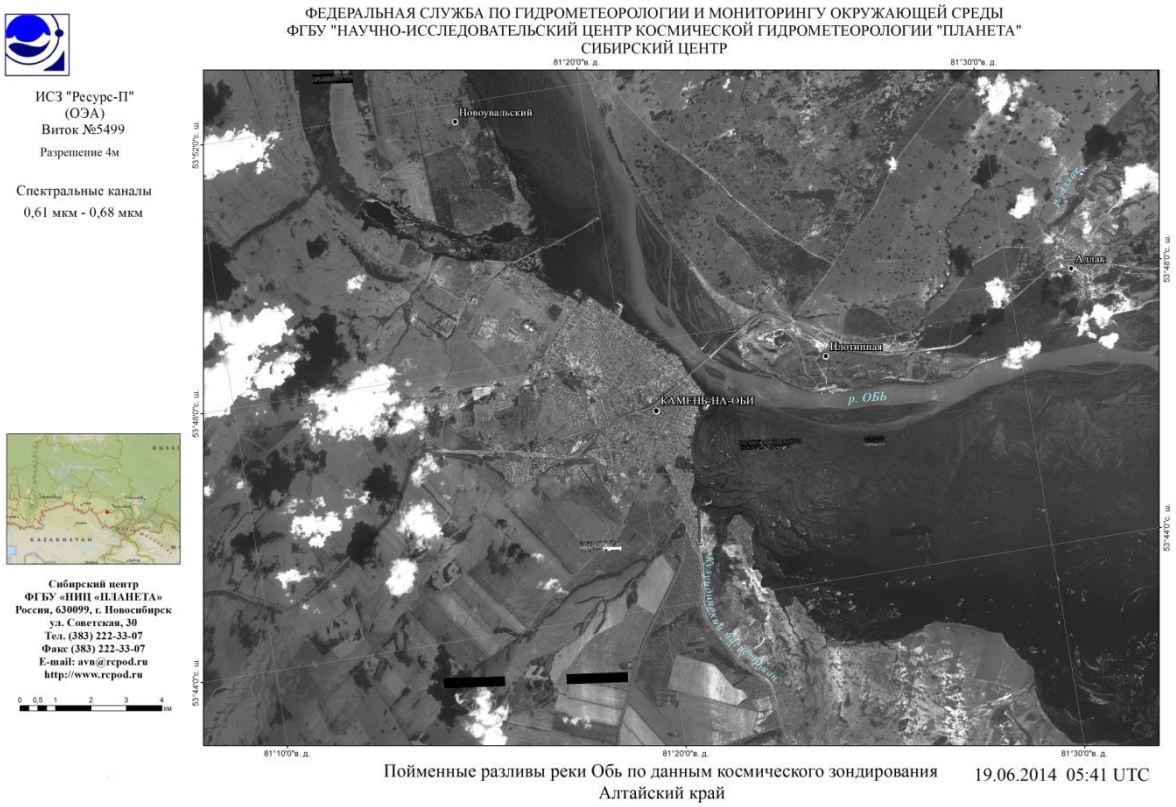


Рис. 2. Паводковая ситуация в районе города Камень-на-Оби

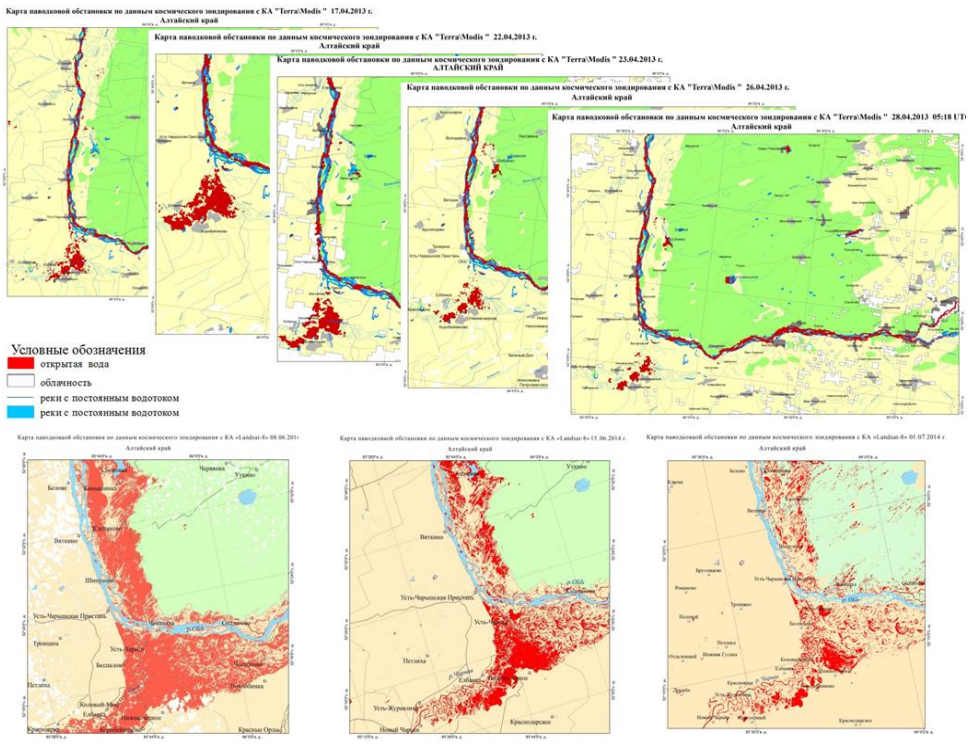


Рис. 3. Результаты многолетнего мониторинга
района Усть-Чарышской Пристани

ГИС-технология оценки риска затопления территории по многолетним данным космического мониторинга реализована в среде ArcGis 10.1 и состоит из трех блоков, соответствующих трем этапам получения результирующей оценки. Первый этап образует ежедневные данные о зонах затопления, получаемые в процессе оперативного мониторинга и обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) различного пространственного разрешения. Второй содержит годовые сведения о зонах затопления, которые формируются из данных первого блока и представляют собой суммарные зоны затопления за период прохождения паводков и наводнений в каждый конкретный год. Третий блок представляет собой подсистему хранения данных (архив) - обеспечивает функции хранения данных и связанных с ними метаданных [2].

Мониторинг должен опираться на ежедневные оперативные наблюдения за состоянием водных объектов. Русла сибирских рек, таких как Енисей, Обь и их комплексы слишком велики, чтобы при наземном изучении находиться в едином поле зрения наблюдателя, и не могут отслеживаться сразу по всей площади распространения потенциальных зон затопления. Использование ДДЗ позволяет оперативно получать информацию о состоянии водных объектов, а при помощи современных ГИС-технологий картографировать границы подтоплений интересующих участков рек, количественно оценить площади затопления.

В мониторинге паводковой ситуации необходимо использовать комплексный подход и широкий диапазон возможностей данных дистанционного зондирования. Таким образом, использование ДДЗ различного пространственного разрешения, минимальной угловой или линейной величиной изобразившегося объекта местности, зафиксированным пикселом [3], позволяет идентифицировать зоны выхода воды на пойму, связанные с подъемом уровня воды в реках.

ДДЗ низкого разрешения применяются при глобальных наблюдениях паводковой обстановки и в большинстве своем являются обзорными данными, на основе которых создаются среднемасштабные и мелкомасштабные тематические карты паводковой обстановки масштабного ряда от 1:50 000 и мельче. Тематическая составляющая таких карт основана на методах цифровой обработки космических данных. Одним из таких методов является технология обработки многоспектральных данных сенсора MODIS космической системы EOS. Исходные данные после калибровки проходят дальнейшую обработку в программе ENVI: трансформируются в картографическую проекцию, дополнительно рассчитывается нормализованный вегетационный индекс (NDVI), затем запускается окончательный расчёт в модуле классификации. Результаты классификации в виде векторных данных экспортируются в ArcGis 10.1, где совмещаются с картографической основой. В результате обработки полученных данных в ГИС отслеживается момент выхода воды на пойму, границы затопления различных участков поймы, скорость продвижения волны паводка, определяемая по последовательным снимкам, а так же оценки площади затоплений.

При угрозе наводнения целесообразно ежесуточно использовать информацию с нескольких спутников для получения более достоверной информации о паводковой ситуации в том или ином регионе. Для этого, мониторинг паводко-

вой ситуации на реках ведется так же со спутника SuomiNPP/VIIRS. Цифровой пороговый алгоритм оценки паводковой ситуации реализован в среде ENVI и представляет собой «дерево решений содержащее 7 узлов, и разделяющее изображение на классы. В классификации задействованы 7 спектральных каналов, а так же некоторые распространенные индексы: вегетационный, снежный и водный, что позволяет так же с высокой долей вероятности выделить на снимке воду. Мониторинг паводковой обстановки проводится по изображениям, полученным в дневное время суток в видимом и ближнем ИК диапазонах съемки, т.е. по отраженной от природных объектов энергии. Однако, в период резкого подъема воды в реках и в облачные дневные часы, возникает необходимость круглосуточного мониторинга паводковой обстановки. Для этого используется длинноволновый ИК диапазон SuomiNPP/VIIRS. Вода имеет самые высокие по сравнению с другими природными объектами значения коэффициента излучения и самые высокие температуры в ночное время, а значит и самые высокие значения яркостных температур на ночных изображениях и высокие контрасты с окружающими объектами. Так, например, почва имеет меньшее значение коэффициента излучения чем вода, что позволяет разделить на ночных изображениях места разливов рек (рис. 4).

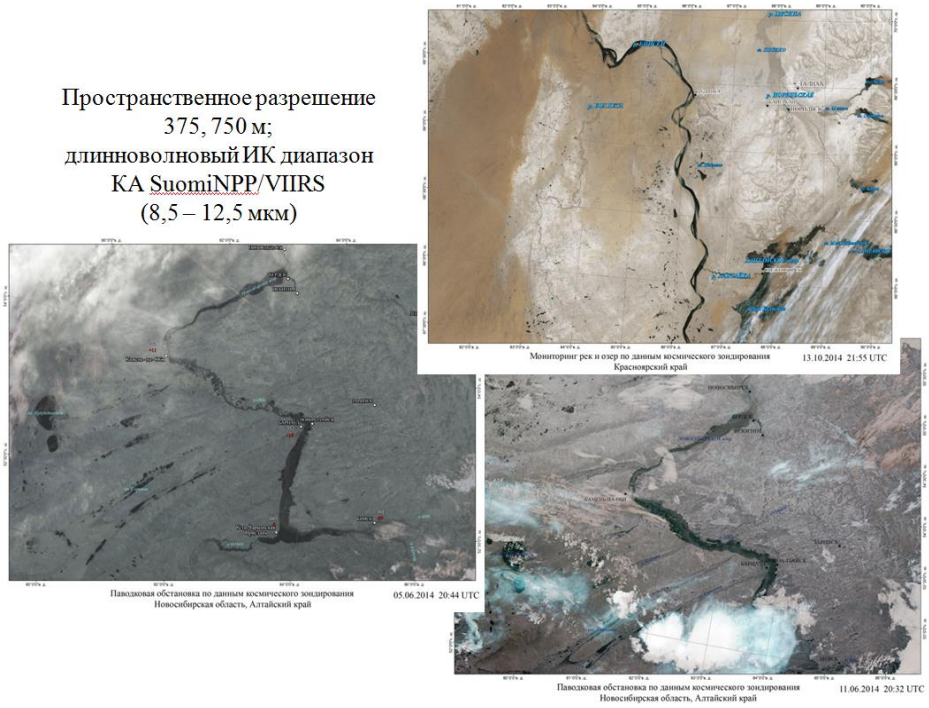


Рис. 4. Мониторинг паводковой ситуации в ночное время суток по данным SuomiNPP/VIIRS

Для более детального мониторинга паводковой ситуации используются ДДЗ высокого и очень высокого разрешений, на которых можно различить мелкие детали объектов [4], что позволяет более подробно идентифицировать подтопленные части населенных пунктов, участков полей занятых сельскохозяйственными культурами и т.д.

Для создания карт паводковой обстановки на основе ДДЗ высокого разрешения используются различные методы цифровой обработки космических изображений. Одним из наиболее известных методов классификации является итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных ISODATA. В этом случае класс воды идентифицируется методом анализа спектральных кривых выделенных классов. Спектральная кривая соответствующая классу воды, имеет характерный ход, и падает с увеличением длины волны от видимого к ближнему ИК диапазону. В то время как спектральные кривые других природных объектов растут с увеличением длины волны (рис. 5).

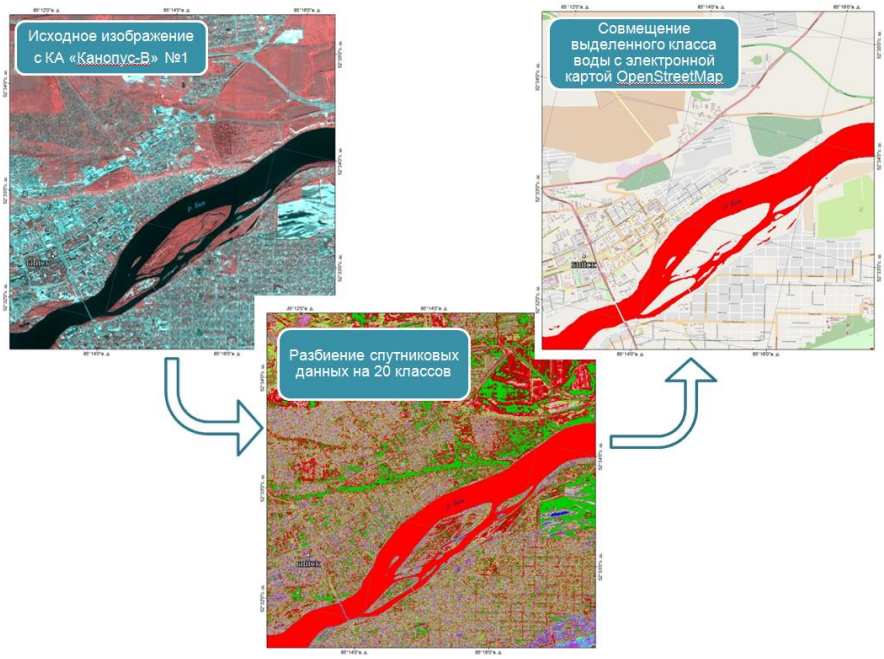


Рис. 5. Классификация ДДЗ без обучения методом анализа данных ISODATA

При выделении водных объектов методом классификации без обучения к классу воды могут быть отнесены и переувлажненные почвы, тени от облаков и т.д. В этом случае целесообразно применять классификацию с обучением, используя в качестве эталонов те объекты, состояние которых точно известно. Это важно при выделении зоны затопления малой площади, которые при классификации без обучения могут не выделяться. Таким образом, выделяется на классифицированном изображении класс, соответствующий водным объектам, после наложения которого на векторную карту можно определить территорию подверженную затоплению. Использовать метод классификации с обучением не всегда удобно при работе с данными в оперативном режиме, т.к. выбор эталонных участков требует определенного количества времени, а так же знания местности изображенной на снимке. В этом случае целесообразно сравнить результаты классификации методом «дерева решений». Данный алгоритм оценки паводковой обстановки был разработан для космических снимков Landsat-8. Исходя из поставленных задач определения водных поверхностей «дерево ре-

шений» имеет всего два пороговых значения: для облачности и водной поверхности. В качестве исходной информации используются данные спутника Landsat-8 датчика OLI. На основе результатов классификаций таких данных создаются и обновляются тематические карты паводковой обстановки с соответствующей нагрузкой. Такие карты предназначены для различных измерений, например площади зеркала водной поверхности.

Результатом выполненных работ является база данных, которая будет еще расширяться и наполняться, и по результатам которой можно будет делать как краткосрочный так и долгосрочный прогноз подтопления той или иной территории совместив ДДЗ с наземными данными. Стоит учитывать, что любая система прогнозирования основана в первую очередь на повторяемости событий.

Главное достоинство ДДЗ при мониторинге паводковой ситуации заключается в том, что они поступают ежедневно, в реальном времени и делают возможным мониторинг паводковой ситуации основных бассейнов рек одновременно в нескольких административно-территориальных единицах СФО. В Сибирском Центре "НИЦ "Планета" спутниковый мониторинг паводковой ситуации на сегодняшний день ведется только с оптико-электронных спутниковых систем, где главным фактором съемки являются безоблачные погодные условия. Таким образом, в условиях безоблачности, картографирование ДДЗ с использованием современных технологий позволяют выделить на реках не только, момент и границы выхода воды на пойму, но и определить скорость продвижения волны паводка по последовательным снимкам, что является основной тематической нагрузкой карт паводковой обстановки любого масштаба. Интеграция полученных результатов с опорными данными в ГИС позволяет представить результаты обработки в картографическом виде и оперативно передавать заинтересованным пользователям [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новгородцева О. Г. Мониторинг паводковой ситуации по данным дистанционного зондирования и составление карты паводковой обстановки в бассейне р. Обь // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск: СГГА, 2008. Т. 3, ч. 2. – С. 270–273.

2. Дистанционное зондирование Земли из космоса: алгоритмы, технологии, данные. Учебное пособие для слушателей молодежной школы-семинара / Сост.: А. А. Лагутин, Р. И. Райкин, Т. Н. Чимитдоржиев. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. – 151 с.

3. Лурье И. К., Косиков А. Г. Теория и практика цифровой обработки изображений. – М.: Научный мир, 2003. –168 с.

4. Чандра А. М., Гош С. К., Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.

© В. Н. Антонов, О. Г. Новгородцева, 2015

УДК 550.34

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧЕ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Александр Александрович Якименко
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)330-70-69, e-mail: al--le@yandex.ru

Дмитрий Алексеевич Караваев
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sscc.ru

Андрей Владимирович Беляшов
Институт геофизических исследований Министерства энергетики, 071100, Республика Казахстан, г. Курчатов, пл. Меридиан, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделением, тел. (722)512-31-46, e-mail: abelyashov@igr.kz

В работе представлены результаты по разработке строения геофизических моделей, содержащих кавернозные зоны, и исследованию структуры и свойств волнового поля при математическом моделировании. Это является важным этапом при решении задач инспекции на месте в проблеме мониторинга подземных ядерных испытаний, связанных с экспериментальными исследованиями методом вибрационного просвечивания Земли (ВПЗ). Проведение численного моделирования с использованием программ для кластеров позволяет выделить характерные и отличительные свойства изучаемых объектов.

Ключевые слова: разностная схема, моделирование, волновое поле, подземный ядерный взрыв.

MODELING OF SEISMIC FIELDS IN PROBLEMS OF MONITORING AND FORECASTING OF CONSEQUENCES OF UNDERGROUND NUCLEAR TESTS

Alexander A. Yakimenko
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, tel. (383)330-70-69, e-mail: al--le@yandex.ru

Dmitriy A. Karavaev
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Candidate of Physics and Mathematical Sciences, Junior Researcher, tel. (383)330-70-69, e-mail: kda@opg.sscc.ru

Andrey V. Belyashov
Institute of Geophysical Research, Ministry of Energy; 071100, Kazakhstan, Kurchatov, Meridian site, candidate of geological and mineralogical sciences, head of department, tel. (722)512-31-46, e-mail: abelyashov@igr.kz

The paper presents the results of the development of the structure of geophysical models with cavernous area, and the study of the structure and properties of the wave field in mathematical modeling. This is an important step in solving problems on-site inspection in the problem of moni-

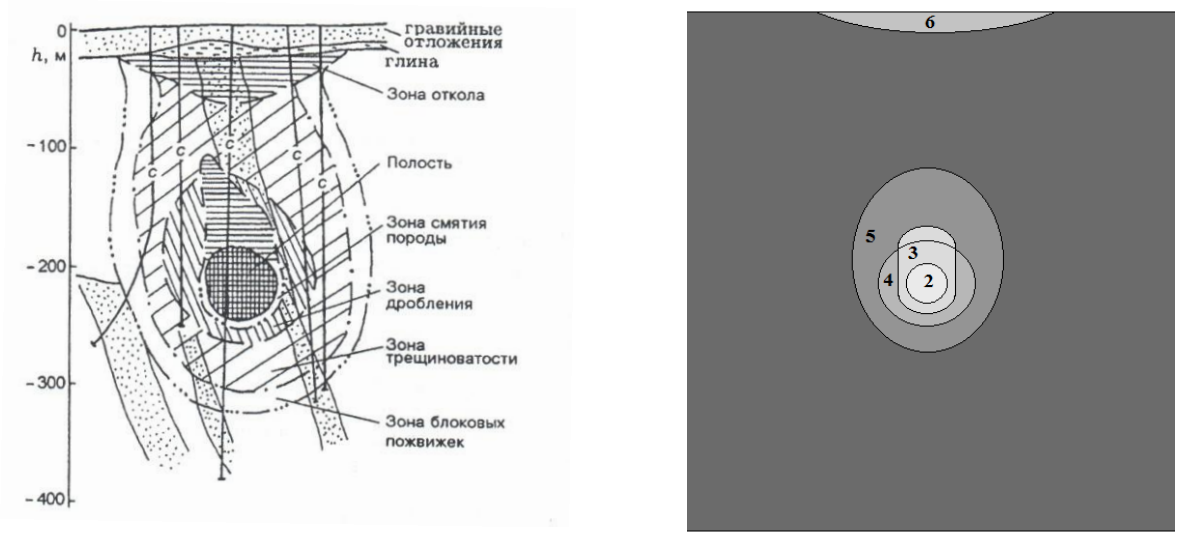
toring underground nuclear tests related to experimental studies by the vibration of the Earth sounding. Carrying out numerical simulations using software for clusters allows you to select the characteristic and distinctive properties of the objects under study.

Key words: difference scheme, simulation, wave field, an underground nuclear explosion.

Актуальность изучения мест проведения подземных ядерных взрывов обусловлена необходимостью решения ряда практических задач в области обеспечения радиационной и геоэкологической безопасности территорий, прилегающих к площадкам ядерных экспериментов. Выполненные взрывы оказали деструктивное воздействие на вмещающие геологические структуры с формированием разуплотненных проницаемых областей, по которым в окружающую среду (вплоть до выхода на дневную поверхность) могут переноситься радионуклидные остатки. Изучение пространственного положения и конфигурации указанных структур поможет в контроле и прогнозировании экологического состояния мировых ядерных полигонов.

Также одним из важных направлений является развитие технологий Инспекции на месте (в частности, сейсмических методов) в поддержку Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

Численное моделирование волновых полей на предполагаемых моделях сред (рис. 1, *б*) поможет в решении указанных задач. По таким снимкам можно выделить группы волн, показывающие наличие в среде кавернозных включений и оценить их геометрические размеры.



а б

Рис. 1. а - Схема центральной зоны ядерного взрыва в скважине №102;
б - Схема 2D модели упругой среды в плоскости xOz.
Цифра – номер элемента модели

Для численного моделирования сейсмических волновых полей требуются высокопроизводительные вычислительные системы и современное программное обеспечение с использованием технологий параллельного программирования.

Для исследования структуры волнового поля, образующегося в результате сейсмического просвечивания среды, проведено моделирование для различных моделей кавернозной зоны. Все численные расчеты выполнены с использованием разработанных программ на кластере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН (ИВМиМГ СО РАН). При этом изучалось влияние геометрии модели на структуру волнового поля неоднородной среды, содержащей каверну, с целью выделения отличительных свойств поля, обусловленных ее присутствием. Для создания физико-геологической модели подземного ядерного взрыва использовались материалы работы [1]. По схеме центральной зоны ядерного взрыва в скважине №102 (рис. 1, *а*) была построена геометрия модели среды, содержащей последствия подземного ядерного взрыва, с основными зонами, образующимися в результате испытания.

На рис. 1, *б* показан фрагмент разработанной и исследованной 2D модели неоднородной упругой среды с линейными размерами 5.0 км по оси Ox и 1.0 км по оси Oz, содержащей подобласти: камуфлетная полость (2); зона смятия горных пород (3); зона дробления горных пород (4); зона интенсивной трещиноватости (5); зона откольного разрушения (6); вмещающая среда (1).

Геометрические размеры и геофизические характеристики зон приведены в табл. и используются программой для расчета компонент волнового поля. На дневной поверхности располагается источник и регистрирующие сейсмоприемники. Частота источника 30 герц. Результатами расчетов и работы разработанного программного обеспечения многоядерных вычислительных систем являются синтетические сейсмограммы и мгновенные снимки волнового поля, рассчитанные по алгоритму, описанному в [2].

В работе рассматривается Uz компонента волнового поля соответствующая вертикальной составляющей сейсмического поля [2].

Таблица

Характеристики включенных в модель зон

№	Область	Радиус, м	Vp, км/с	Vs, км/с	p, кг/м3
1	Вмещающая среда	5000x1000	6,0	3,45	3,65
2	Камуфлетная полость	57	0,3	0	1,2
3	Зона смятия горных пород	(70, 139)	1,0	0,57	2,0
4	Зона дробления горных пород	124	2,0	1,15	2,5
5	Зона интенсивной трещиноватости	200	4,5	2,59	3,0
6	Зона откольного разрушения	(724, 30)	3,0	1,7	2,5

На рис. 2 представлены синтетические сейсмограммы для компоненты Uz для различных расстановок систем наблюдения, в прямоугольной системе координат: по горизонтали представлены координаты сейсмоприемников, по вертикали – время вступления различных волн. Для удобства эти же данные представлены в другом виде на рис. 3.

Из рис. 2 можно отчетливо выделить зону откольного разрушения (вертикальная полоса сейсмотрасс с большей амплитудой) и определить ее протяженность по координате X как разницу координат сейсмоприемника конца

и начала возмущений. При детальном изучении синтетических сейсмограмм можно определить времена вступления сейсмических волн обусловленных отражением или прохождением через границы зон, отмеченных в табл.

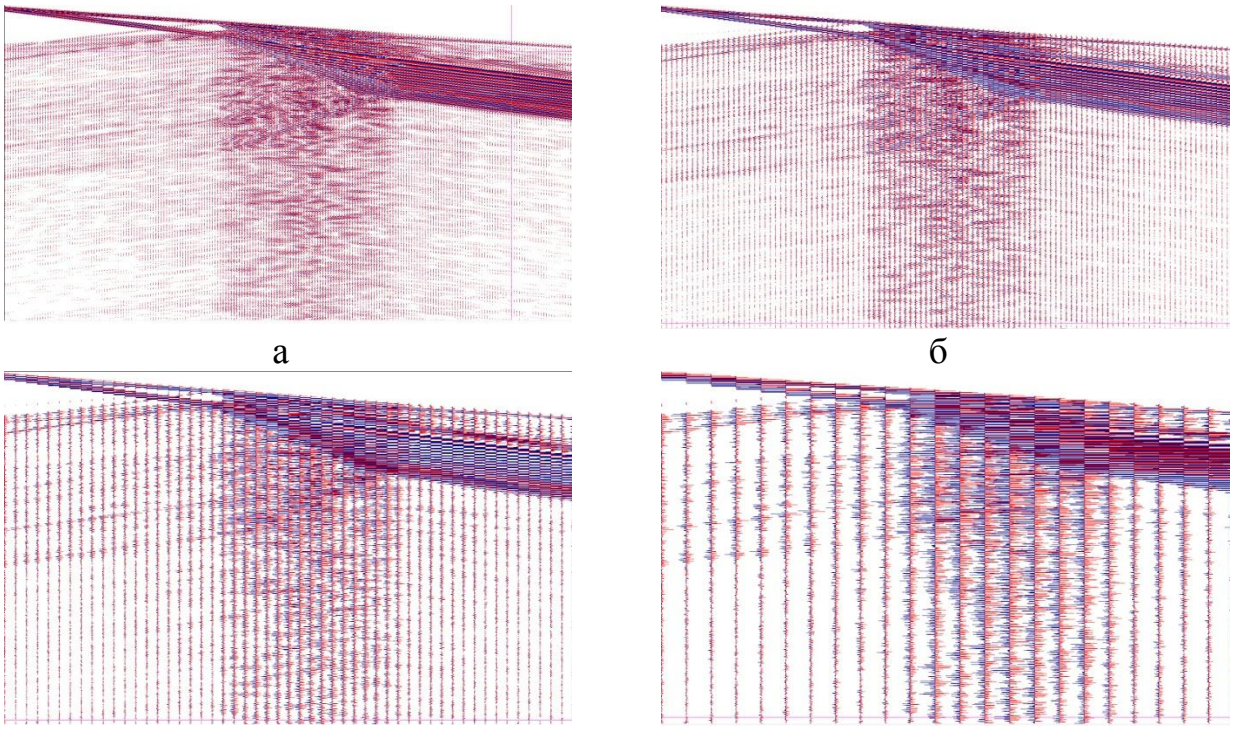


Рис. 2. Рассчитанные синтетические сейсмограммы для компоненты Uz волнового поля для различного количества регистрирующих приемников (а – 234 приемника, б – 117 приемника, в – 56 приемника, г – 23 приемника)

На рис. 3, *а-г* показано, как уменьшение регистрирующих сейсмоприемников может влиять на выделение участков зон кавернозного включения. Так, при достаточно редкой расстановке возможна ситуация с пропуском небольшой полости или прилегающей зоны. Результаты приведены для компоненты Uz, в прямоугольной системе координат: по горизонтали представлены времена вступления различных волн, по вертикали – координаты сейсмоприемников.

Таким образом, результаты расчетов, выполненные на разработанном программном обеспечении, дают возможность выделения информативных групп волн и определения их времен вступления в границы зон последствий подземного ядерного взрыва. Возможность использовать при расчетах различное количество регистрирующих сейсмоприемников может позволить определить их минимальное необходимое количество для требуемой разрешающей способности сейсмограммы. Полученные результаты ложатся в основу разработки рекомендаций для определения зон подземного ядерного взрыва.

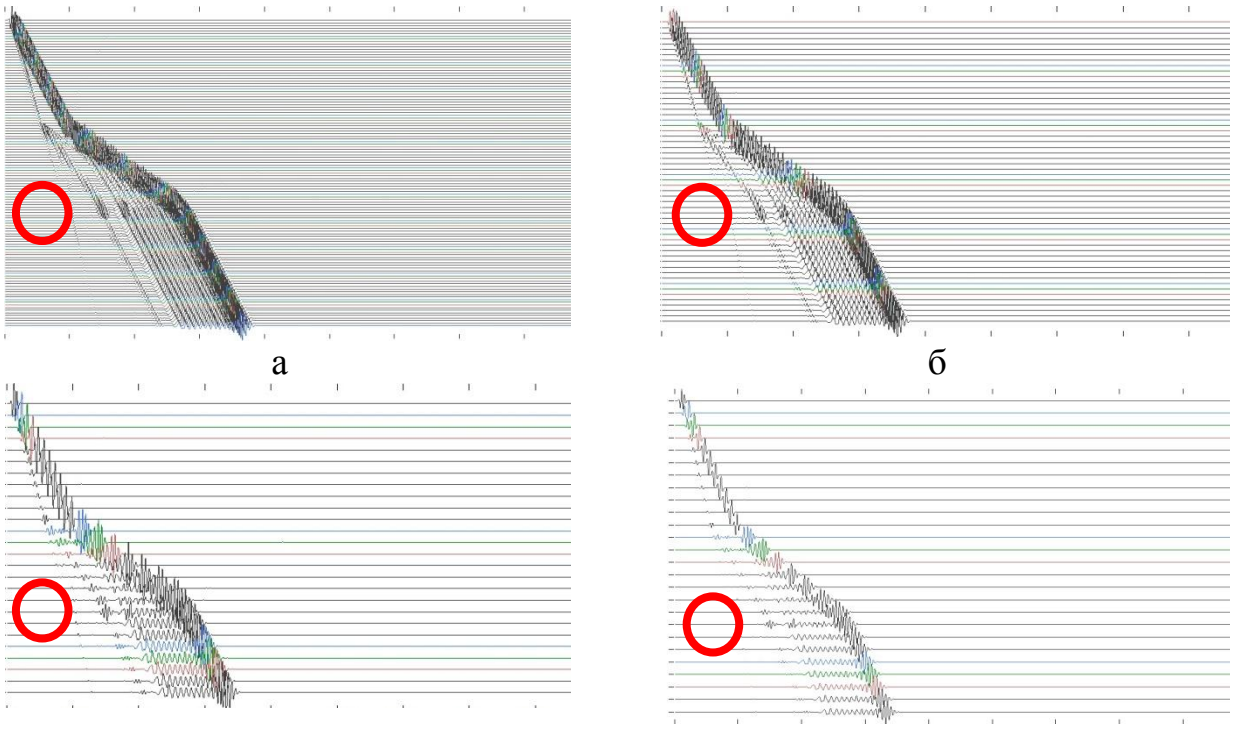


Рис. 3. Рассчитанные синтетические сейсмограммы для компоненты Uz волнового поля для различного количества регистрирующих приемников (а – 234 приемника, б – 117 приемника, в – 56 приемника, г – 23 приемника)

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-07-00312, 14-05-00867, 15-07-06821, МОН РК 1760/ГФ4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адушкин В.В. Изменение свойств горных пород и массивов при подземных ядерных взрывах / Адушкин В.В., Спивак А.А. // Физика горения и взрыва, - 2004, - т. 40, № 6, - С. 15 – 26.

2. Якименко А.А. Численное моделирование распространения упругих волн в средах с подземными полостями на суперЭВМ / Якименко А.А., Караваев Д.А. // Научный вестник НГТУ. – 2013, №2. – с.99-104.

3. Родин Г. Сейсмология ядерных взрывов: Пер. с англ. М.: изд. «Мир», 1974. – 190 с.

© А. А. Якименко, Д. А. Караваев, А. В. Беляшов, 2015

УДК 551.51+519.6

РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ ГРАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ОБТЕКАНИИ КРУТЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ

Михаил Серафимович Юдин
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник, тел (383)330-61-52, e-mail: yudin@ommfao.sscc.ru

Настоящая работа является продолжением работы по расчету с помощью с двумерной негидростатической модели конечных элементов распространения сформировавшегося холодного атмосферного фронта над орографическими препятствиями различной формы. Приводятся результаты моделирования скоростей гравитационных течений при обтекании крутых препятствий в стратифицированной атмосфере для крутого холма и горной долины. Сравнение проведенных модельных расчетов с имеющимися в литературе данными показывает, что модель качественно описывает динамику скоростей гравитационного течения над этими препятствиями.

Ключевые слова: гравитационное течение, орография, стратификация.

CALCULATION OF VELOCITIES OF GRAVITY FLOWS OVER STEEP OBSTACLES IN A STRATIFIED ATMOSPHERE

Michael S. Yudin
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentieva Pr., tel. (383)330-61-52, e-mail: yudin@ommfao.sscc.ru

This paper is an extention of a study on the simulation with a 2D non-hydrostatic finite-element model of the propagation of a well formed cold atmospheric front over orographic obstacles of various shapes . The results of calculation of velocities of gravity flows over steep obstacles in a stratified atmosphere are presented for a steep hill and mountain valley. A comparison between these results and the relevant data available in the literature shows that the model describes adequately the dynamics of velocities of gravity flows over these obstacles.

Key words: gravity flow, orography, stratification.

Введение

Гравитационные течения в атмосфере встречаются в самых различных формах: бризовые фронты, штормовые потоки и т. д. Среди них важную роль играют холодные фронты, которые распространяются вблизи земной поверхности и форма которых может сильно меняться под влиянием неоднородностей орографии.

Для прогнозирования динамики атмосферных фронтов успешно используются математические модели. Неоднородности орографии в этих моделях обычно учитываются с помощью систем координат, основанных на преобразованиях пространственных переменных, спрямляющих орографию (см, например, [1]).Преимущество этих преобразований состоит, главным образом, в том,

что граничные условия на естественной физической нижней границе могут быть введены в модель сравнительно простым способом.

Можно показать, однако, что такие преобразования применимы только для не очень крутой орографии. Кроме того, введение орографии в модель с помощью таких преобразований может привести к вычислительной неустойчивости разностных аппроксимаций, которые были вполне устойчивы в моделях без орографии [2].

Для устранения этих препятствий кажется естественным использовать математические модели, основанные на дискретизации конечных элементов [2]. Именно такой подход был применен в работе[3],где с помощью двумерной негидростатической модели конечных элементов моделировалось распространение сформировавшегося холодного атмосферного фронта над орографическими препятствиями различной формы . Настоящая работа является продолжением [3] и посвящена расчету скоростей гравитационных течений при обтекании крутых препятствий в стратифицированной атмосфере.

Модель

Для моделирования скоростей гравитационных течений при обтекании крутых препятствий в стратифицированной атмосфере здесь используются уравнения Навье-Стокса для сжимаемого атмосферного потока. Точный вид уравнений приведен в [3],более подробное изложение этой модели можно найти, например, в [4].В данной работе применяется двумерный вариант модели с пространственной дискретизацией конечных элементов [2].Дискретизация по времени проводится в форме [5] и приведена также в работе [3].

Результаты

Приведем результаты расчетов скоростей гравитационного течения при обтекании крутых препятствий в стратифицированной атмосфере с параметрами из работы [1] для распространения сформировавшегося холодного атмосферного фронта над орографическими препятствиями в виде крутого холма и горной долины аксиально-симметричной гауссовой формы высотой и, соответственно, глубиной 600 м. Расчетная область 25 км х 2 км. В отличие от [1], где фронт порождался источником холодного воздуха, начальная форма фронта в нашей работе задавалась в виде ступенчатой функции высотой 400 м.

На рис. 1 показано начальное положение холодного атмосферного фронта при соприкосновении с препятствием: холмом (слева) и долиной (справа) для нейтральной стратификации. На рис. 2 приведены результаты расчетов эволюции нормальной к фронту компоненты скорости в тех же точках.

В работе [3] приведена таблица, где показаны рассчитанные значения наветренной и подветренной скоростей при распространении холодного атмосферного фронта над орографическими препятствиями различной формы и стратификации. Следует указать здесь на неточность допущенную в этой таблице: начальная высота фронта должна быть уменьшена на 200 м, что соответ-

ствует значению при соприкосновении фронта с препятствием. Исправленная таблица приведена ниже.

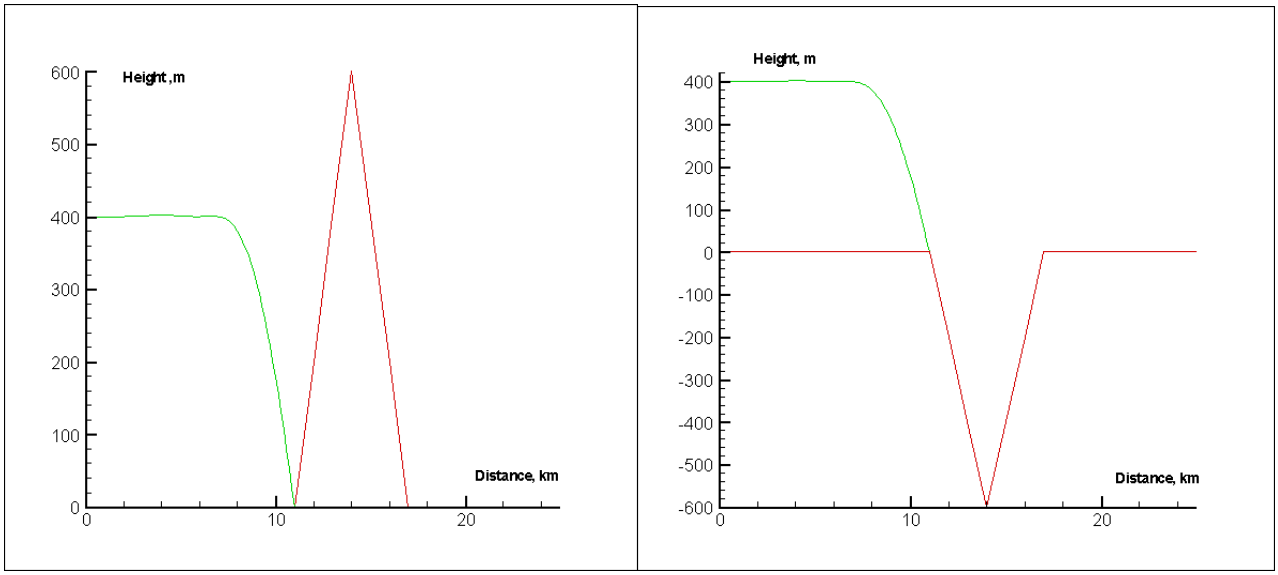


Рис. 1. Положение холодного атмосферного фронта при соприкосновении с препятствием: холмом (слева) и долиной (справа). Нейтральная стратификация

Рис. 2 показывает, что при обтекании крутых препятствий скорость потока находится в колебательном режиме. Получено качественное согласие между приведенными данными и результатами расчетов, проведенных в [1] с помощью модели, где неоднородности орографии учитывались с помощью преобразований пространственных переменных, спрямляющих орографию. В этой модели холодный атмосферный фронт порождался протяженным источником холодного воздуха.

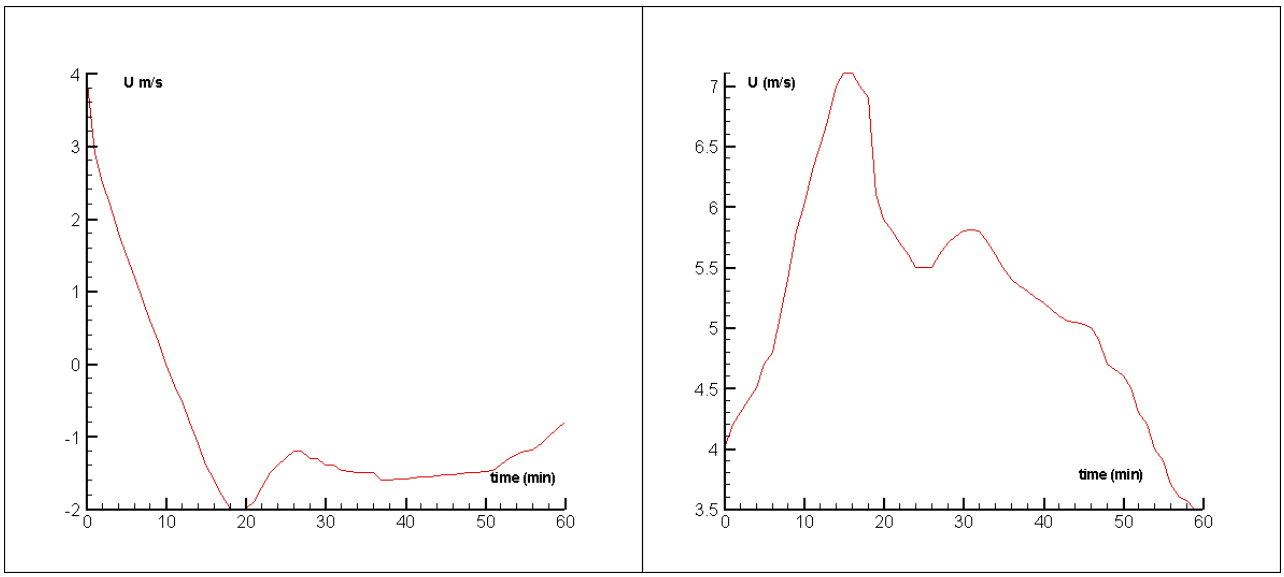


Рис. 2. Эволюция нормальной к фронту компоненты скорости в точке соприкосновения с препятствием: холмом (слева) и долиной (справа). Нейтральная стратификация

Таблица

Рассчитанные значения наветренной и подветренной скоростей при распространении холодного атмосферного фронта над орографическими препятствиями различной формы и стратификации

ВЫСОТА ПРЕПЯТСТВИЯ (м)	НАЧАЛЬНАЯ ВЫСОТА ФРОНТА (м)	СТРАТИФИКАЦИЯ (К/100м)	НАВЕТРЕННАЯ СКОРОСТЬ (м / сек)	ПОДВЕТРЕННАЯ СКОРОСТЬ (м / сек)
0	400	0.0	4.5	4.5
0	400	0.35	5.1	5.1
600	400	0.0	4.4	3.7
600	400	0.35	4.9	2.7
600	100	0.35	3.0	0.0
600	700	0.35	7.5	4.5
- 600	400	0.0	4.5	3.9

Заключение

Результаты этих предварительных расчетов показывают, что приведенная модель конечных элементов, по-видимому, может быть использована для моделирования распространения гравитационных течений при обтекании крутых препятствий в стратифицированной атмосфере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-01-00125-а) и Президиума РАН (программа 43).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bischoff-Gauss I., Gross G., Wippermann F. Numerical studies on cold fronts. Part 2: Orographic effects on gravity flows //Meteorol. Atmos. Phys- 1989- V.40. - P.159--169.

2. Yudin M.S., Wilderotter K. Simulating atmospheric flows in the vicinity of a water basin. // Computational Technologies. V.11, - No. 3,-P. 128-134.

3. Юдин М. С. Исследование эффектов орографии и температурной стратификации при распространении атмосферных фронтов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 146–150.

4. Yudin M. S. Numerical simulation of orographic waves // Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., – 1995. – V.2. – P. 101–107.

5. Ikawa M. Comparison of some schemes for non-hydrostatic models with Orography // J. Meteor. Soc. Japan.-1988- V. 66,- No. 5,- P. 753-776.

© М. С. Юдин, 2015

УДК 622.271:351.77

ИНФОРМАТИВНЫЕ ФАКТОРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛЕЙ В ПРОБЛЕМЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Марат Саматович Хайретдинов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru

Гюльнара Маратовна Воскобойникова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)330-87-43, e-mail: gulya@opg.sscc.ru

Галина Федоровна Седухина
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: galya@opg.sscc.ru

Анализируется роль информативных внешних факторов при взаимодействии сопряженных геофизических полей техногенного и природного характера. Результаты анализа подтверждены численными и натурными экспериментами.

Ключевые слова: геофизический мониторинг, сейсмический вибратор, природные и техногенные события, сопряженные поля, акустические колебания, численные и натурные эксперименты.

INFORMATIVE FACTORS OF INTERACTION OF THE INTERFACED FIELDS IN THE PROBLEM OF GEOPHYSICAL MONITORING

Marat S. Khairetdinov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Senior Researcher; State technical University in Novosibirsk, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx Ave, tel. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru

Gyulnara M. Voskoboynikova
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Researcher; State technical University in Novosibirsk, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx Ave, tel. (383)330-87-43, e-mail: gulya@opg.sscc.ru

Galina F. Segukhina
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Researcher, tel. (383)330-87-43, e-mail: galya@opg.sscc.ru

The role of informative external factors at interaction of the interfaced geophysical fields of technogenic and natural character is analyzed. Results of the analysis are confirmed by numerical and natural experiments.

Key words: Geophysical monitoring, seismic vibrator, natural and technogenic events, interfaced fields, acoustic oscillation, numerical and natural experiments.

Введение. Изучение процессов распространения инфразвука, порождаемого техногенными взрывами, а также природными источниками типа землетрясений, извержений вулканов, и др. имеет давнюю историю. В тоже время следует отметить слабую изученность этих процессов от влияния метеофакторов и, прежде всего, в экспериментальной части. Это обусловлено отсутствием маломощных в сравнении со взрывами источников инфразвука с высокими метрологическими характеристиками. На сегодня в качестве таких источников могут быть использованы сейсмические вибраторы, обеспечивающие высокую повторяемость экспериментов при изучении процессов распространения с учетом влияния различных внешних факторов. Результаты данной работы опираются на вибрационный метод изучения обозначенных процессов.

Постановка задачи. В качестве интегральной характеристики при изучении разрушительных свойств инфразвука в окружающей среде принимается *удельная плотность акустичесмкой энергии*:

$$E = \frac{1}{\rho\, c} \int_0^T p^2(t)\, dt. \qquad (1)$$

Здесь $\rho\, c$ – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное 42 г/(см^2·с); $p(t)$ – акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика; T – длительность акустической волны.

В (1) акустическое давление является функцией многих параметров, определяемых условиями излучения и дальнего распространения акустических колебаний. Эта зависимость может быть представлена в виде некоторого функционала: $p(t)= F[Q\, f_1(c,\varphi\ w,\alpha), f_2\,(T), \delta(H), \psi(t)]$. Здесь Q – мощность источника; $f_1(c,w)$ – функциональная зависимость акустического давления от соотношения скорости c и направления φ распространения акустической волны от источника с одной стороны и скорости w и азимутального направления α ветра с другой; $f_2(T)$ – высотное распределение температуры воздуха; $\delta(H)$ – функция, отражающая неоднородность дневной поверхности земли; $\psi(t)$ – фактор неоднородности атмосферы, зависящий, в частности, от влажности воздуха. Таким образом, задача оценивания (1) является многофакторной. Получение оценок в такой постановке наталкивается на сложности из-за отсутствия полноты априорных сведений. Другой путь преодоления априорной неопределенности связан с получением оценок (1) на основе экспериментов с применением сейсмических вибраторов в качестве излучателей инфранизкочастотных акустических колебаний. Оба варианта рассмотрены в настоящей работе.

Информативные факторы взаимодействия сопряженных геофизических полей. В качестве решения одной из задач здесь рассмотрено влияние направления и скорости ветра на распространение инфразвука, порождаемого сейсмическими вибраторами ЦВ-40, ЦВ-100. Результат такого взаимодействия является явление пространственной фокусировки акустических колебаний, при кото-

рой максимум акустического давления p достигается при совпадении направлений фронтов распространения колебаний от вибратора и ветра. Описывается такое явление с помощью *фактора фокусировки*, равного отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде:

$$f = I\ \ z,\theta,\varphi\ \ / I_0\ , \qquad (2)$$

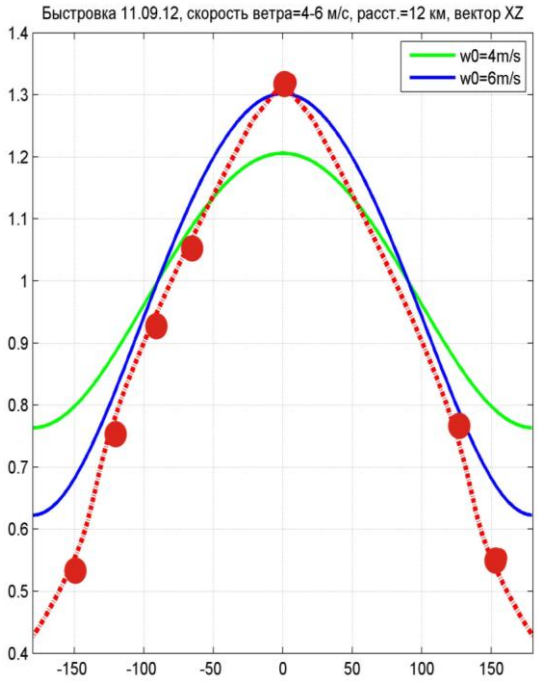


Рис. 1. Зависимость фактора фокусировки f от горизонтального расстояния от источника r и азимута точки наблюдения: Расчетные графики для радиуса круговой расстановки датчиков с радиусом 12 км и скоростей ветра 6 м/с (кривая синего цвета) и 4м/с (кривая зеленого цвета). Высота источника над землей-5 м. Красный точечный график экспериментально полученный для той же расстановки для вибратора ЦВ-40 при скорости ветра 4-6 м/с

где сферические углы θ (зенитный угол) и φ (азимут) характеризуют начальное направление луча от источника по отношению к вертикальной координате z и горизонтальной оси x соответственно [1, 2]. При этом направление последней совпадает с направлением ветра.

Более подробно методика расчета (2) представлена в [3]. На рис. 1 приведены расчетные зависимости f от азимута точек наблюдения. Приведенные результаты соответствуют радиусу круговой расстановки датчиков 12 км и скоростям ветра 6 м/с (синий график) и 4м/с (зеленый график). Высота источника над землей – 5 м. Красный график соответствует экспериментально полученной при радиусе круговой расстановки 12 км и скорости ветра 4–6 м/с. Для сравнения приводится экспериментально получен-ный график фактора фокусировки с ис-пользованием сейсмического вибратора ЦВ-40 и круговой расстановки датчиков с радиусом 12 км при скорости ветра 4-6 м/с. Как видно из сравнения расчет-ного и экспериментального графиков значения раскрыва $\Delta\varphi$ в обоих случаях в основном совпадают.

Зависимости давления p от других метеофакторов – температуры, влажности воздуха – вытекают из обобщенного выражения состояния газа $f(p,\rho,t)=0$, связывающего между собой давление p, плотность (сжатие) ρ и температуру t воздуха [4]. Из определения скорости звука в воздухе по Лапласу: $c_Л = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}}$,

где $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$ – есть отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении

к теплоемкости воздуха при постоянном объеме, следует, что давление является квадратичной функцией скорости звука, зависящей, в свою очередь, от температуры и влажности воздуха.. Так, скорость звука во влажном воздухе составляет $c_o = 20.1\sqrt{T\left(1+0.273\,{}^{e}\!/_{p}\right)}$, где e – влажность воздуха, $T = t + T_o$, где $T_o = 273K$. При нормальном давлении и $T = T_o = 273K$ (0° С) скорость звука в сухом воздухе равна 331 м/с. В случае наличия ветра в атмосфере возникает дрейф скорости звука, с учетом которого скорость звука будет складываться из скорости звука в невозмущенной атмосфере – c_0 и скорости ветра w_0: $c = c_0 + w_0 \cos\varphi$, где φ – угол между направлением ветра и направлением на точку наблюдения источника звука. С учетом перечисленных метеофакторов интегральная зависимость давления от них может быть представлена в виде:

$$p = {}^{\rho}\!/_{\gamma}\,(331 + 0.6t + 0.07e + c_0 + w_0\cos\varphi)^2 .$$

Экспериментально полученные оценки давления инфразвука от вибратора с учетом ветра и влажности представлены на рис. 2. Полученные результаты экспериментов, в частности, показывают, что в схожих метеоусловиях повышение влажности до 95 % может приводить к (3-5)- кратному повышению акустического давления вдоль направления ветра (на рисунке это нулевое направление). Как показывают результаты экспериментов, свыше 95% -ной влажности уровни давления резко уменьшаются.

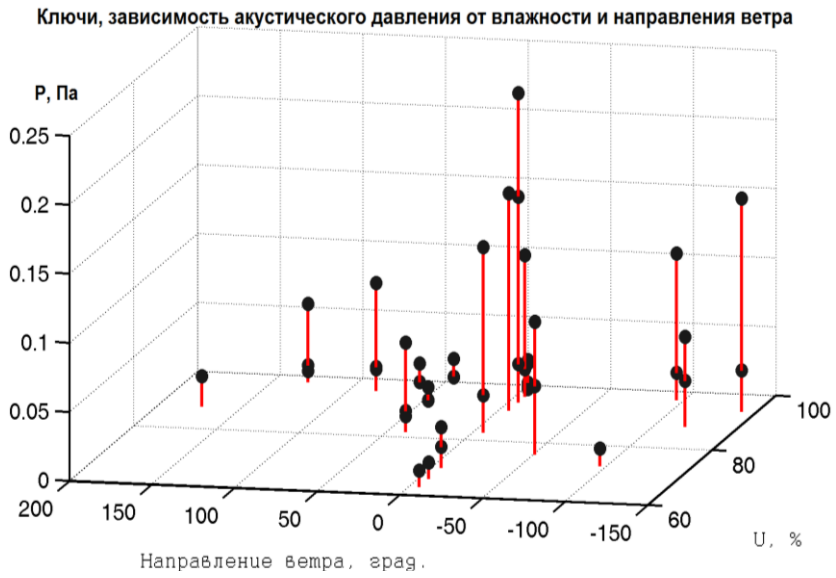


Рис. 2. Зависимость уровней акустических колебаний вибратора ЦВ-40 на удалении 50 км с учетом направления ветра и влажности

В качестве одного из информативных факторов взаимодействия сейсмических и акустических волновых полей ранее было обнаружено явление акустосейсмической индукции [5, 6]. В сезонных экспериментах с вибратором ЦВ-40 на одной и той же трассе протяженностью 50 км было показано, что выраженность отмеченного явления в большой мере зависит от покрова дневной поверхности Земли. При наличии снежного покрова указанное явление практически всегда отсутствует, хотя акустические датчики уверенно регистрируют в воздухе акустическую волну. Это иллюстрируется на рис. 3. И наоборот, в летнее время эффект ярко выражен, что доказы-

вается одновременной регистрацией акустических волн от вибратора ЦВ-40 с помощью сейсмического и акустического датчиков (рис. 4).

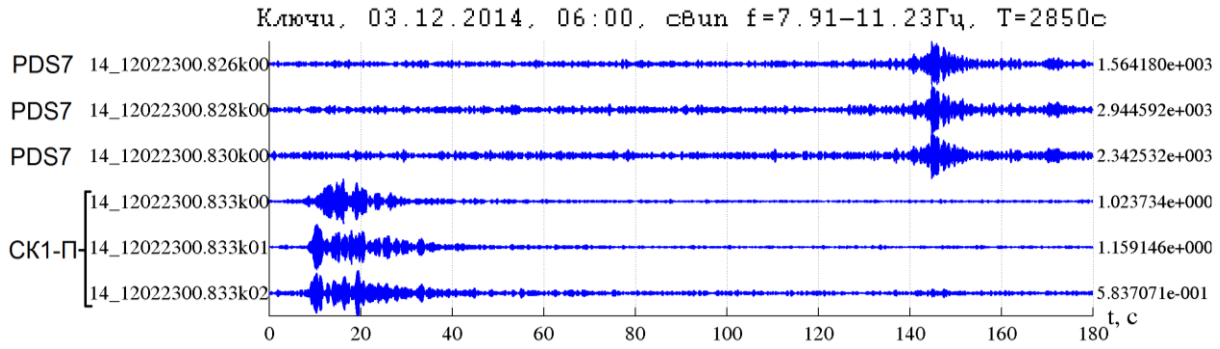


Рис. 3

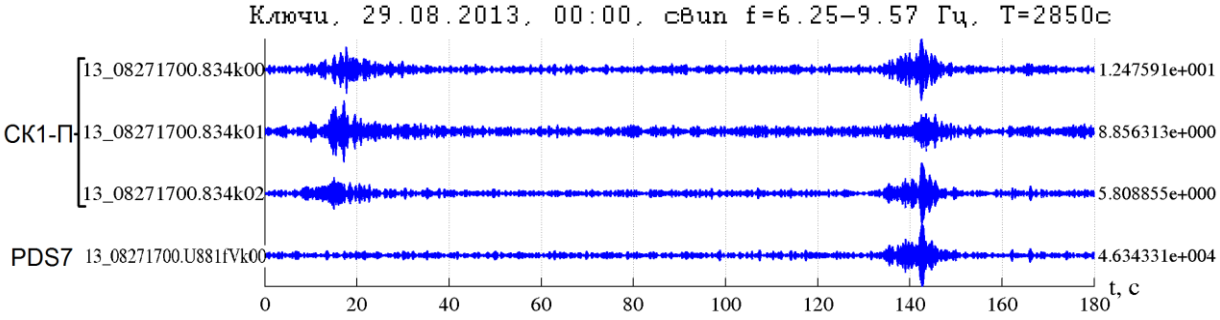


Рис. 4

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 261 с.

2. Разин А. В. О распространении звука в неоднородной движущейся атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океан. 1982. Т.18, №6. - С. 674-676.

3. Хайретдинов М. С. Оценивание геоэкологического рисков от массовых взрывов с помощью сейсмических вибраторов / М. С. Хайретдинов, С. А. Авроров, Г. М. Воскобойникова // Вестник Кемеровского государственного университета, вып.№4 (52), Т.1, 2012 - С.115-122.

4. Исакович А. М. Общая акустика. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. - 496с.

5. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И., Ковалевский В.В., Михайленко Б.Г., Пушной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Доклады АН, т.346, N 5, 1996, с. 664–667.

6. Ковалевский В.В. Исследование акустосейсмических волновых полей, генерируемых поверхностными сейсмическими вибраторами. / В.В. Ковалевский // Акуст. журн., 2005, Т. 51. - С.92–102.

© М. С. Хайретдинов, Г. М. Воскобойникова, Г. Ф. Седухина, 2015

УДК 551.511.42.001.572(571.14)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПАДЕНИЙ ПЫЛИ В ОКРЕСТНОСТЯХ ТЭЦ Г. НОВОСИБИРСКА

Владимир Федотович Рапута
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Наталья Петровна Ахматова
ФГБОУ ВО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, кандидат технических наук, доцент, тел. (383)221-46-31, e-mail: ahmatova_natalya@mail.ru

Татьяна Владимировна Ярославцева
ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Виктор Владиславович Турбинский
ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, доктор медицинских наук, директор, тел. (383)343-34-01, e-mail: ngi@cn.ru

Разработана модель реконструкции поля выпадений аэрозольной примеси от совокупности источников. Проведена её апробация на данных натурных исследований пылевого загрязнения снежного покрова в окрестностях ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Новосибирска. Представлены оценки суммарных выпадений пыли от рассматриваемых источников на территории города в зимнем сезоне 2013/14 г.

Ключевые слова: примесь, атмосфера, снежный покров, загрязнение, пыль, численное моделирование, реконструкция.

THE RESEARCH OF DUST DEPOSITION AROUND THE AREA OF NOVOSIBIRSK THERMAL POWER STATION

Vladimir F. Raputa
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 pr. Akad. Lavrentjeva, leading researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Natalya P. Akhmatova
Siberian state water transport university, 630099, Russian, Novosibirsk, 33 Shetinkina, doctor of technical sciences, professor, tel. (383)221-46-31, e-mail: ahmatova_natalya@mail.ru

Tatyana V. Yaroslavtseva
Novosibirsk scientific research institute of hygiene, 630108, Russia, Novosibirsk, 7 Parhomenko, researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Victor V. Turbinsky
Novosibirsk scientific research institute of hygiene, 630108, Russia, Novosibirsk, 7 Parhomenko, doctor of medical sciences (MD), head of institute, tel. (383)343-34-01, e-mail: ngi@cn.ru

A model of aerosol fallout fields from a plurality of sources has been developed. Approbation of the model on data from field studies of snow dust pollution in the vicinity of thermal power station-2 and thermal power station-3 of Novosibirsk was carried out. The estimate of the total fallouts of dust from sources considered in the city in the winter season 2013/14 were presented.

Key words: impurity, atmosphere, snow, dirt, dust, numerical modeling, reconstruction.

При сжигании углеводородного топлива энергетическими установками происходит значительное загрязнение атмосферы городов. Этому способствует также неблагоприятные метеорологические условия (слабые ветры, температурные инверсии, туманы и т.д.), приводящие к появлению смога, что представляет большую опасность для здоровья населения [1].

Отрицательное влияние тепловых электроцентралей (ТЭЦ) на окружающую среду в значительной степени связано с расходованием больших количеств кислорода на горение топлива и поступлением в атмосферу окислов азота, серы, углерода, полиароматических углеводородов. Поэтому возникает необходимость изучения состава загрязняющих веществ и закономерности их распространения в воздушном бассейне городов.

Объекты, материалы и методы исследования. Топливно-энергетический комплекс г. Новосибирска включает в себя несколько крупных ТЭЦ, а также около 200 мелких и средних котельных. Новосибирские ТЭЦ - 2 и ТЭЦ - 3 входят в объединенную энергосистему Сибири. Они расположены в Ленинском районе г. Новосибирска в пределах весьма значительной городской застройки.

На ТЭЦ - 2 выброс отходящих газовоздушных смесей происходит через две близко расположенные дымовые трубы высотой 100 и 120 м соответственно диаметрами 5,1 и 8 м. Северо-западнее от ТЭЦ - 2 на расстоянии 1.6 км находится промплощадка ТЭЦ - 3. Выброс отходящих газовоздушных смесей происходит, в основном, через трубу высотой 120 м и диаметром 8,2 м. Расчетные выходы золы и шлака по ТЭЦ - 2 в среднем составляют 120 тыс.т/год, по ТЭЦ - 3 - 130 тыс.т/год.

Для оценки влияния ТЭЦ - 2 и ТЭЦ - 3 г. Новосибирска на состояния атмосферного воздуха и территорий города использовались наблюдения загрязнения снежного покрова. Снеговые пробы отбирались с учетом условий переноса и рассеяния загрязняющих веществ. Маршрутный отбор проб снега в окрестностях ТЭЦ проводился 12 марта 2014 г. Схема отбора проб представлена на рис. 1. Точки наблюдений располагались на открытых участках местности с учетом расположения застройки, наличия ближайших локальных источников (автотрассы, частный сектор, мелкие котельные), а также лесной и парковой зоны. Выполнение перечисленных условий в пределах города является непростой задачей и, как правило, успешность ее решения устанавливается на более поздних стадиях исследования при интерпретации данных наблюдений.

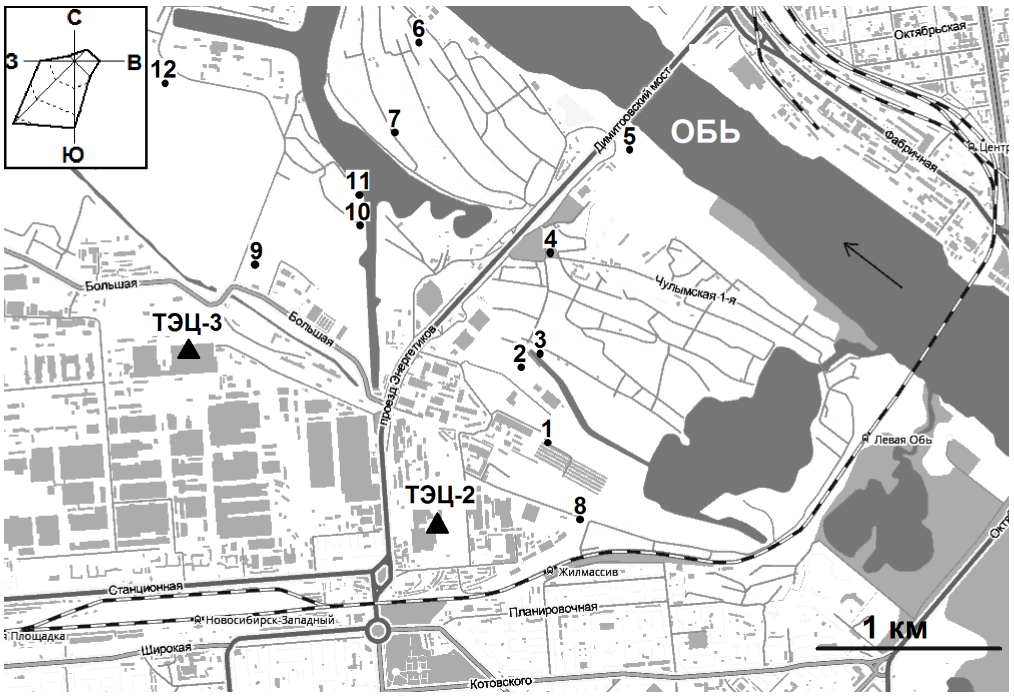


Рис. 1. Схема отбора проб снега. Среднезимняя роза ветров на высоте 100 м.
▲ - положение труб ТЭЦ

Керны снега отбирались при помощи пластмассовой трубы на участках, где сохранился неповреждённый снеговой покров. Лабораторная обработка снеговых проб заключалась в топлении, фильтровании снеготалой воды и последующем определении массы сухого осадка. Результаты лабораторных исследований и расчеты концентрации пыли в районе ТЭЦ - 2 и ТЭЦ – 3 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Твердый осадок в пробах, взятых в окрестностях ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3
(12 марта 2014 г.)

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
мг/л	50	146	87	80	102	58	63	20	93	68	79	67
г/м^2	4,1	13,1	7,5	6,3	7,6	4,4	5,8	2,1	9,1	5,6	4,9	5,8

Исследование химического состава снеговой воды и выделенного осадка проводили в аккредитованных лабораториях Новосибирского НИИ гигиены, Института неорганической химии СО РАН. Статистическая обработка и математическое моделирование выполнялись в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Модель оценивания поля длительных выпадений пыли от совокупности источников. В монодисперсном приближении в случае одиночной трубы поле плотности выпадений примеси $\Phi(\cdot,\varphi)$ на снежный покров описывается с помощью следующей регрессионной зависимости [2]

$$\Phi(r,\varphi,\vec{\theta}) = A(r,\vec{\theta}) \cdot P(\varphi + 180^\circ), \quad (1)$$

где

$$A(r,\vec{\theta}) = \theta_1 \cdot r^{\theta_2} \cdot e^{-\frac{2r_m}{r}} \quad . \quad (2)$$

Оценки неизвестных параметров θ_1, θ_2 могут быть найдены с использованием данных наблюдений, например, по методу наименьших квадратов. Параметр r_m определяется через геометрические характеристики источника [1].

Пусть в плоскости (x, y) расположены два источника с координатами (x_1^0, y_1^0) и (x_2^0, y_2^0). Тогда с учётом соотношений (1), (2) суммарное поле выпадений примеси от обоих источников можно представить в виде

$$\Phi(x, y, \vec{\theta}, \vec{S}) = \theta_1 \Phi_1(r, \varphi, \theta_2) + S_1 \Phi_2(\rho, \psi, S_2), \quad (3)$$

где

$$\Phi_1(r,\varphi,\theta_2) = r^{\theta_2} e^{-\frac{2r_{\max}}{r}} P(\varphi + 180^\circ), \quad r = \sqrt{(x - x_1^0)^2 + (y - y_1^0)^2}, \varphi = arctg\frac{y - y_1^0}{x - x_1^0},$$

$$\Phi_2(\rho,\psi,S_2) = \rho^{S_2} e^{-\frac{2r_{\max}}{\rho}} P(\psi + 180^\circ), \quad \rho = \sqrt{(x - x_2^0)^2 + (y - y_2^0)^2}, \psi = arctg\frac{y - y_2^0}{x - x_2^0}.$$

Если использовать данные наблюдений в четырёх точках местности, то для определения неизвестных параметров $(\theta_1, \theta_2, S_1, S_2)$ необходимо решить следующую систему 4-х нелинейных уравнений

$$\Phi(x_j, y_j, \vec{\theta}, \vec{S}) = C_j, \qquad j = \overline{1,4} \quad , \quad (4)$$

где C_j - концентрация примеси, измеренная в точке (x_j, y_j).

При численном решении системы уравнений (4) следует, в первую очередь, исключить параметры θ_1 и S_1, входящие в неё линейно. В результате задача сводится к системе двух нелинейных уравнений для нахождения θ_2 и S_2, решение которой можно найти вполне стандартными методами.

Численный анализ результатов исследований. На рис. 2 представлены результаты реконструкции полей выпадений пыли по моделям (2), (3) и данным наблюдений, представленным табл. 1. Сравнительный анализ полученных результатов численного моделирования с данными наблюдений показывает их вполне удовлетворительное согласие. Заметные отклонения измеренных и вычисленных значений концентраций пыли в точках № 2, 5, 12 могут быть обусловлены влиянием локальных источников (автотрассы, частный сектор, пылящие поверхности и др.). В соответствии с розой ветров максимумы выпадений пыли расположены в северо-западных направлениях от ТЭЦ на расстояниях около 1 км, что указывает, учитывая высоту труб, на заметную неоднородность в зимнее время дисперсного состава выпадающей пыли.

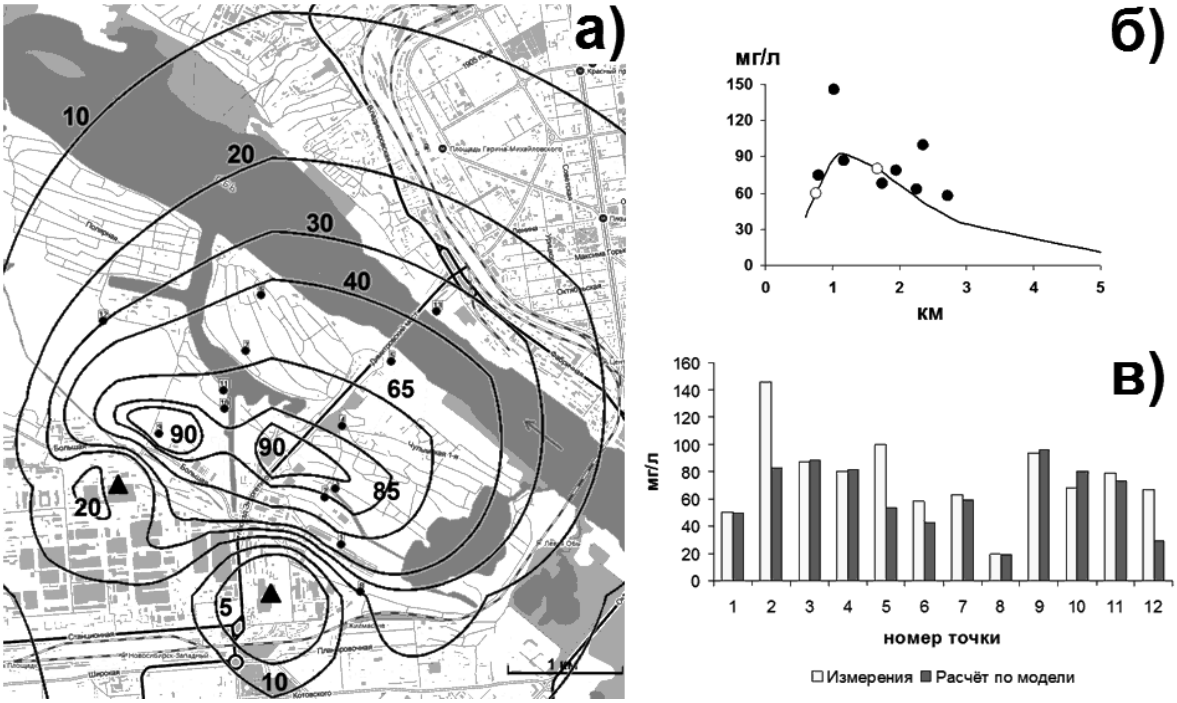


Рис. 2. Восстановленное с использованием зависимости (3) суммарное поле выпадений (г/л) пыли от ТЭЦ – 2 и ТЭЦ – 3 в зимнем сезоне 2013/14 г. (а). Измеренные и восстановленные на основе модели (2) значения концентрации пыли (мг/л) в северо-восточном секторе от ТЭЦ – 2 (б) и суммарно от обеих ТЭЦ в точках отбора проб снега (в). ○, ● - опорные и контрольные точки измерений

Заключение. Анализ результатов натурных исследований проб снега показал, что пылевое загрязнение левобережной части г. Новосибирска выбросами ТЭЦ - 2 и ТЭЦ – 3 относительно не велико. В целом, на маршрутах пробоотбора по мере удаления от ТЭЦ прослеживается характерная динамика уменьшения концентраций пыли. Интенсивность выноса пыли по направлениям вполне согласуется с зимней розой ветров. Численный анализ данных мониторинга снегового покрова в окрестностях ТЭЦ - 2 и ТЭЦ - 3 г. Новосибирска выявил существование достаточно простых закономерностей формирования полей длительного загрязнения местности.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН 4.9.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.

2. Рапута В.Ф. Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей // Оптика атмосферы и океана. - 2007. - Т. 20, № 6. - С. 506-511.

© В. Ф. Рапута, Н. П. Ахматова, Т. В. Ярославцева, В. В. Турбинский, 2015

УДК 550.383

О СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ И НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ РОССИЙСКОЙ СЛУЖБЫ ИСТИННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЮСА

Николай Николаевич Семаков
Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы СО РАН, 630060, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, доцент, тел. (913)487-32-29, e-mail:semakov@igm.nsc.ru

Александр Анатольевич Ковалев
Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы СО РАН, 630060, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-исследователь, тел. (923)121-28-37, e-mail: heinekens@list.ru

Ольга Ивановна Федотова
Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы СО РАН, 630060, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-исследователь, тел. (383)330-12-61, e-mail: baley@ngs.ru

Анатолий Федорович Павлов
Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы СО РАН, 630060, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-исследователь; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, старший преподаватель, тел. (961)221-72-69

По материалам регистрации параметров магнитного поля Земли в обсерваториях, входящих в Международную Реальную Магнитную Сеть (INTERMAGNET), построены пути движения магнитных полюсов и графики скоростей их движения для обсерваторий из разных регионов земного шара. Пространственные масштабы и скорости этих перемещений существенно зависят от степени возмущенности магнитного поля для разных дней и от степени удаленности обсерватории от истинных магнитных полюсов для одного и того же дня. Полученные значения скоростей движения магнитного полюса дают новую ценную информацию о скоростях процессов, отвечающих за наблюдаемую пространственно-временную морфологию магнитного поля Земли. Возрастание скорости магнитных полюсов и тенденция к смещению северного магнитного полюса в российский сектор Арктики делают актуальной задачу организации российской службы истинного магнитного полюса.

Ключевые слова: обсерватория, виртуальный магнитный полюс, движение полюсов, склонение, наклонение, истинный магнитный полюс.

ABOUT THE SPEED OF THE MOVEMENT OF MAGNETIC POLES AND NEED OF CREATION OF THE RUSSIAN SERVICE OF THE TRUE MAGNETIC POLE

Nikolay N. Semakov
Altai-Sayansk branch of Federal state budgetary institution of science of Geophysical service of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630060, Russia, Novosibirsk, 3 av. of the academician Koptyuga, candidate of geological and mineralogical sciences, Ph.; Novosibirsk state university, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Pirogov St., associate professor of geophysics ph., tel. (383)330-12-61, e-mail: semakov@igm.nsc.ru

Alexander A. Kovalyov
Altai-Sayansk branch of Federal state budgetary institution of science of Geophysical service of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630060, Russia, Novosibirsk, 3 av. of the academician Koptyuga, research engineer, Ph., tel. (383)330-12-61, e-mail: heinekens@list.ru

Olga I. Fedotova
Altai-Sayansk branch of Federal state budgetary institution of science of Geophysical service of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630060, Russia, Novosibirsk, 3 av. of the academician Koptyuga, research engineer, Ph., tel. (383)330-12-61, e-mail: baley@ngs.ru

Anatoly F. Pavlov
Altai-Sayansk branch of Federal state budgetary institution of science of Geophysical service of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630060, Russia, 3 Novosibirsk, av. of the academician Koptyuga, research engineer, ph.; Novosibirsk state university, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Pirogov St., senior teacher, Ph., tel. (961)221-72-69

On materials of registration of elements of terrestrial magnetism in the observatories entering the International Real Magnetic Network (INTERMAGNET) ways of the movement of magnetic poles and graphics of speeds of their movement for observatories from different regions of the globe are calculated. Spatial scales and speeds of these movements significantly depend on degree of disturbance of a magnetic field for different days and on degree of remoteness of observatory from true magnetic poles for the same day. The received values of speeds of the movement of a magnetic pole give new valuable information on speeds of the processes which are responsible for observed space-time morphology of a magnetic field of Earth. Increase of speed of magnetic poles and a tendency to shift of a North magnetic Pole in the Russian sector of the Arctic do actual a task of the organization of the Russian service of a true magnetic pole.

Key words: observatory, virtual magnetic pole, movement of poles, declination, inclination, true magnetic pole.

Вопросы, связанные с положением и перемещением магнитных полюсов, имеют отношение не только к познанию механизма генерации магнитного поля Земли, но и к ее геологической истории. Изучение экскурсов и инверсий магнитных полюсов и возможные их биологические, климатические и хозяйственные последствия важны как для науки, так и для других "земных" сфер деятельности человека. При этом влияние "магнитной погоды" в Арктике будет все более ощутимым на всей территории Евразии по мере приближения области максимальных магнитных возмущений к берегам Сибири.

Говоря о перемещении магнитного полюса, мы должны отчетливо понимать, о каком полюсе идет речь. Для расчета положения магнитного полюса по наблюдениям в данной точке необходимо знать четыре параметра: географические координаты этой точки (φ,λ), а также склонение (D) и наклонение (I) вектора магнитной индукции. Два магнитных полюса, вычисленных таким путем (северный и южный) магнитологи издавна называют "виртуальными", в смысле "фактическими", то есть основанными на фактических измерениях. Эти полюсы "расположены" в противоположных точках земного шара и их координаты могут быть рассчитаны по измеренным значениям D и I в любой точке Земли.

В отличии от "виртуальных" магнитных полюсов "истинный" северный и "истинный" южный магнитный полюс не противоположны (по крайней мере в течение последних столетий) и для определения их координат требуется гораздо больше усилий. Это обусловлено необходимостью проведения магнитных измерений непосредственно в районах расположения соответствующего истинного магнитного полюса. Такие измерения в Арктике и Антарктике проводятся со времен Джеймса Росса [1] и требуют не только тщательной научно-организационной подготовки, но и соответствующего аппаратурного обеспечения и опыта, а также «везения» (отсутствие магнитных бурь и сложностей, связанных с ледовой и метеорологической обстановкой во время измерений в точках предполагаемого нахождения истинного полюса). Но, по сути дела, любой полюс, вычисленный по измеренным, то есть фактическим значениям склонения и наклонения, является виртуальным. А о степени его соответствия истинному магнитному полюсу можно судить по близости величины измеренного наклонения к 90^0.

В последние десятилетия определением положения северного истинного магнитного полюса занимались, в основном, Ларри Ньюитт и другие магнитологи из Геофизической службы Канады [2-4]. Поскольку область, в которой "живет" северный истинный магнитный полюс, перемещается от Канадского Арктического архипелага к Таймыру, встает вопрос о создании Российской службы истинного магнитного полюса. В качестве одной из базовых магнитных обсерваторий для такой службы логичнее всего было бы выбрать работающую с 1935 года магнитную обсерваторию на мысе Челюскин. Магнитное наклонение в этой обсерватории превысило значение $87{,}5^0$, что сейчас уже больше, чем величина наклонения в обсерватории Резольют-Бей, которая была организована как базовая для Канадской службы истинного магнитного полюса. В качестве абсолютных D-I магнитометров могут быть использованы усовершенствованные на новой элементной базе варианты феррозондового магнитометра, разработанного в магнитной обсерватории "Новосибирск" и прошедшего проверку во время советско-канадского трансарктического лыжного перехода СССР - Северный Полюс - Канада [5, 6].

Но основная трудность в определении координат истинного магнитного полюса, которую сложно преодолеть даже в случае отмеченного выше "везения", связана с теми скоростями, которые способен развивать в своем непрерывном движении магнитный полюс. На рис. показано изменение скорости движения магнитного полюса по минутным данным обсерватории Резольют-Бей.

В табл. приведены данные о полученных средних (Vvmp) и максимальных (max Vvmp) скоростях движения виртуальных магнитных полюсов по минутным значениям склонения и наклонения за 17.03.2013 в магнитных обсерваториях, расположенных в разных районах земного шара, входящих в сеть INTERMAGNET [7]. Кроме значения скоростей указан путь, пройденный магнитным полюсом за эти сутки (L), а также максимальный разброс положений полюса (∇).

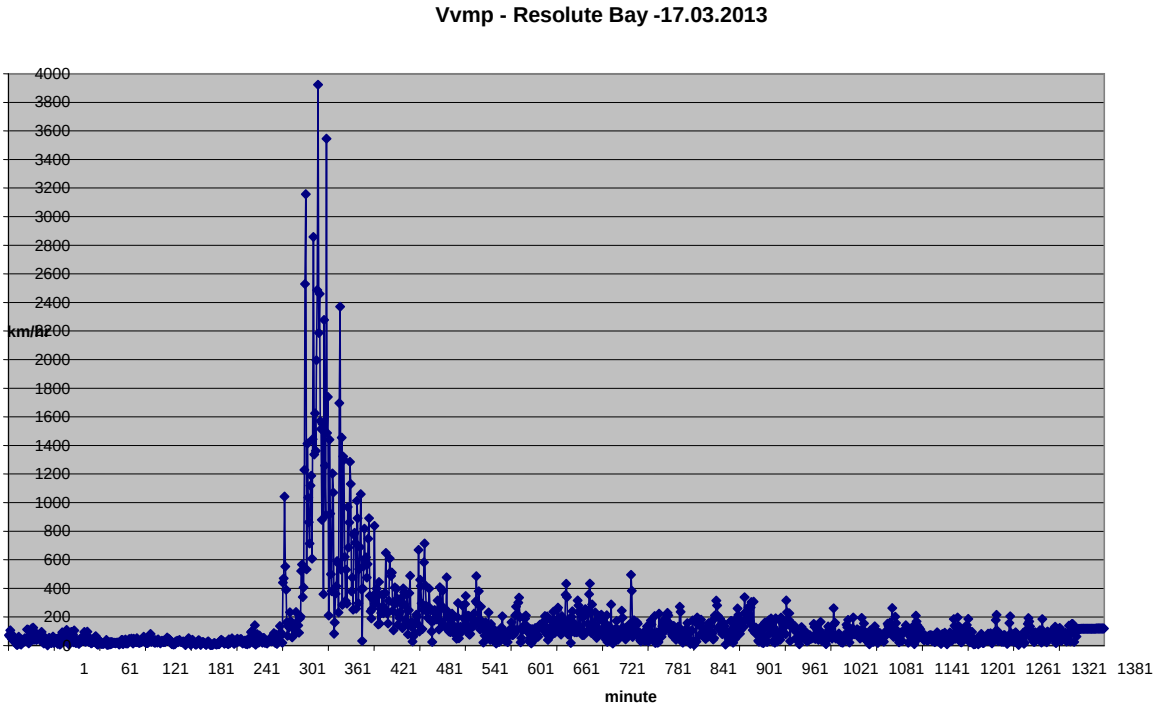


Рис. Скорость движения виртуального магнитного полюса рассчитанная по данным обсерватории Резольют-Бей за 17.03.2013

Таблица

Параметры движения северного и южного виртуальных магнитных полюсов, рассчитанные по данным нескольких магнитных обсерваторий за 17.03.2013

Station Name	CODE	φ°	λ°	Vvmp, *km/h*	max Vvmp, *km/h*	L, *km*	∇, *km*
Resolute Bay	RES	74.69	265.105	161.4	3922.8	3869	275
Novosibirsk	NVS	55.03	82.9	33.5	284.3	804	41
Irkutsk	IRT	52.167	104.45	27.4	211.3	658	39
Alibag	ABG	18.638	72.872	5.5	77.4	132	15
Addis Ababa	AAE	9.035	38.766	5.6	75	131	12
Vassouras	VSS	-22.4	316.35	16.7	279.2	400	43
Casey	CSY	-66.283	110.533	127.6	1796.6	3061	184
Mawson	MAW	-67.604	62.879	256.4	3702.4	6150	264

Можно заметить, что по данным среднеширотных и низкоширотных обсерваторий скорости движения виртуальных магнитных полюсов (средние и максимальные) значительно меньше, чем скорости, полученные в Арктике и Антарктике.

Проведенный анализ движения магнитных полюсов приводит к следующим выводам:

– Минутные данные магнитных обсерваторий, пересчитанные в координаты соответствующих магнитных полюсов, показывают удивительную подвиж-

ность магнитных полюсов, развивающих в отдельные моменты сверхзвуковую скорость.

– Траектория движения магнитных полюсов как в спокойное время, так и во время магнитных возмущений представляет собой не хаотичное движение, а набор "петель" различной формы и размеров.

Выражаем большую благодарность всем сотрудникам магнитных обсерваторий Резольют-Бей, Иркутск, Алибаг, Аддис-Абеба, Вассорас, Кейси, Моусон и Новосибирск, данные которых были использованы для наших расчетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ross, J. C., On the position of the North Magnetic Pole, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 124, 46-51, 1834.

2. Newitt, L.R. and Niblett E.R. Relocation of the north magnetic dip pole//Can. J. Earth Sci.- 1986.- Vol. 23.- P.1062-1067.

3. Newitt, L.R. and C.E. Barton. The position of the North Magnetic Pole in 1994// J.Geomag. Geoelectr., 48, 221-232, 1996.

4. Newitt, L.R., A.Chulliat, and J.-J. Orgeval. Location of the North Magnetic Pole in April 2007// Earth Planets Space, 61, 703-710, 2009.

5. V. V. Kuznetsov, I. V. Pavlova, and N. N. Semakov. Estimation of the Position of Virtual Magnetic Poles // Geol. Geofiz. -1990.- T.31.-№2.- C. 115–116.

6. Kuznetsov V. V., Pavlova I. V., Semakov N. N., Newitt L.R. Virtual magnetic poles, magnetic anomalies, and the location of the north magnetic pole//Russian Geology and Geophysics.- V.38(7).-P.1312-1320, 1997.

7. INTERMAGNET (International Real Magnetic Network, 2013) register. http://www.intermagnet.org/data-donnee/

© Н. Н. Семаков, А. А. Ковалев, О. И. Федотова, А. Ф. Павлов, 2015

УДК 519.6:551.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ ПРИБАЙКАЛЬЯ НА ОСНОВЕ СЦЕНАРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Эльза Андреевна Пьянова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Лаврентьева, 6, кандидат физико-математический наук, младший научный сотрудник, e-mail: pianova@ngs.ru

Представлены некоторые результаты численного моделирования переноса примеси в Байкальском регионе. Показано влияние температурной стратификации атмосферы на распространение загрязнений в направлении акватории Байкала при северо-западном ветре.

Ключевые слова: гидротермодинамика и качество атмосферы, математическое моделирование атмосферных процессов, природоохранное прогнозирование.

STUDY OF PASSIVE POLLUTANTS TRANSPORT IN THE ATMOSPHERE OF CISBAIKALIA BASED ON SCENARIO NUMERICAL MODELLING

Elza A. Pyanova
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Ph. D., e-mail: pianova@ngs.ru

Some results of numerical modeling of pollutant transport in the Baikal region are presented. The effect of temperature stratification of the atmosphere on the pollutants spreading in the direction of Lake Baikal by the north-west wind is shown.

Key words: atmospheric dynamics, air quality, mathematical modeling of atmospheric processes, environmental prediction.

В Байкальском регионе, особенно в Иркутской области, располагается большое количество промышленных объектов. И, несмотря на то, что наиболее крупные располагаются более чем в 60км от побережья Байкала, есть вероятность, что загрязняющие выбросы от этих объектов могут достигать байкальской акватории [1, 2]. Способствовать этому могут северо-западные ветры, которые, наряду с юго-восточным направлением, являются преобладающими, а также тот факт, что многие выбросы загрязняющих веществ производятся из труб большой высоты, что также способствует дальнему рассеиванию веществ. Еще один фактор, влияющий на дальность переноса и интенсивность рассеивания, это состояние турбулентного перемешивания в атмосфере, которое напрямую зависит от распределения температуры по высоте.

В связи с этим для изучения влияния этих факторов на процессы переноса примеси от наиболее близких к байкальской акватории источников Иркутского промышленного комплекса, в работе рассмотрены результаты расчетов нескольких сценариев моделирования при северо-западном набегающем потоке и различной температурной стратификации. Представленные ниже результаты численного моделирования являются продолжением исследований по оценке

качества атмосферы Байкальского региона, поддержанных ранее Интеграционным проектом №8 СО РАН «Оценка влияния промышленных источников Прибайкалья на качество атмосферы над акваторией Байкала».

В этой работе ограничимся рассмотрением нескольких сценариев только для летнего периода, а именно для характерных ситуаций июля. Численные исследования процессов переноса осуществлялись на основе модели турбулентного переноса пассивной примеси над сложной орографией [3]. Значения метеорологических величин несущей среды, как входных данных для модели переноса примеси, рассчитывались по модели динами атмосферы[3,4], которая также адаптирована к условиям сложного рельефа Байкальского региона. По этой модели рассчитывался суточный ход метеорологических элементов, соответствующий типичным ситуациям для июля. В качестве заслуживающих внимания метеорологических сценариев был выбран эксперимент с устойчивой температурной стратификацией для нижних слоев атмосферы, и эксперимент с нейтральной стратификацией. В каждом случае для верхних слоев задавалась стратификация близкая к безразличной. Данные о средних характеристиках для температуры, влажности и других метеопараметров, на основе которых моделировалось их суточное изменение, были взяты из климатических справочников.

Моделировались атмосферные процессы над областью 666x710 км^2, охватывающей озеро Байкал и части территорий Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края. Высота расчетной области 6 км. Моделирование для такой значительной территории велось с тем расчетом, чтобы более точно описать ветровые процессы в районе Байкала. Если вести расчеты над меньшей территорией, то можно недоучесть процессы формирования горных ветров в районе высоких хребтов, окаймляющих Байкал и влияющих на ветровые поля региона в целом, и тем самым получить неверные картины распределения метеорологических величин в Южном Прибайкалье.

Численные расчеты проводились на сетке 667x711x50 узлов с шагами сетки по горизонтали $\Delta x = \Delta y = 1$ км, по вертикали $\Delta z = 100$-200 м. Источники выбросов задавались точечными, мощность каждого источника составляла 1 условную единицу за единицу времени $\Delta t = 60$ с. Ниже рассмотрены распределения полей концентрации пассивной примеси от условных источников выбросов, расположенных в Иркутске, Шелехове и Байкальске. Во всех численных экспериментах на верхней границе расчетной области задавался фоновый набегающий поток северо-западного направления 4м/с. На всех рисунках изображены изолинии функции рельефа моделируемой области, а также поле ветра и изолинии распределения концентраций примесей на высоте 100м над поверхностью. Внешняя изолиния для каждого источника соответствует значению 0.1 условной единицы, внутренняя – 100 условным единицам.

На рис. 1 представлены результаты расчетов на момент 8 ч утра местного времени, соответствующие сценарию с устойчивой стратификацией для нижних слоев атмосферы. На рисунке можно увидеть заметное отклонение шлейфов от северо-западного направления. Это можно объяснить тем, что сформировавшийся в ночные часы горный ветер с Передового хребта взаимодействует с северо-западным фоновым потоком и сносит примесь восточнее. В более поздние

утренние часы (рис. 2а), как показывают расчеты для этого же сценария, загрязнения переносятся в направлении Байкала вдоль Ангары. В утренние часы хорошо выражены струйные течения, формирование которых характерно при устойчивой стратификации атмосферы. Этот факт также обсуждается в [2]. К полудню и позже (рис. 3а) при прогреве подстилающей поверхности начинает развиваться турбулентное перемешивание нижних слоев, которое заметно усиливает рассеяние примеси в верхние слои и ослабляет перенос в сторону акватории Байкала. В вечерние и ночные часы при остывании поверхности опять большую роль начинают играть ветровые потоки со стороны горных хребтов (рис. 4а), расположенных на юго-западе области моделирования.

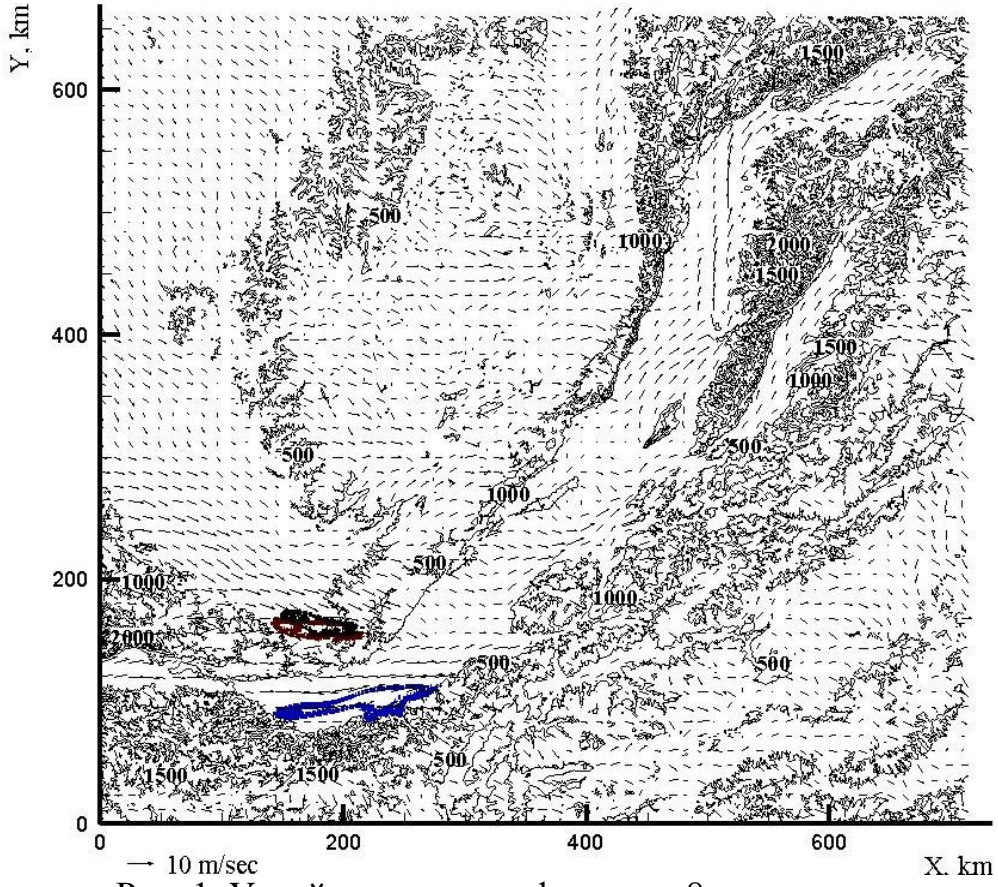


Рис. 1. Устойчивая стратификация. 8 часов утра

Результаты расчетов аналогичного эксперимента, но при нейтральной температурной стратификации в нижних слоях, показали, что для такого сценария характерно более раннее развитие турбулентного перемешивания (рис. 2б–4б) с выносом загрязнения в верхние слои и ослаблением переноса на акваторию Байкала. Влияние различий в задании фоновой стратификации температуры сказалось и на формировании ветровых потоков над всей акваторией. В первом эксперименте над Байкалом наблюдалась устойчивая трансформация северо-западного фонового ветра в юго-западный поток над большей его территорией в течение всех моделируемых суток. В сценарии с нейтральной фоновой стратификацией над Байкалом формируются в основном потоки северо-западного и западного направления.

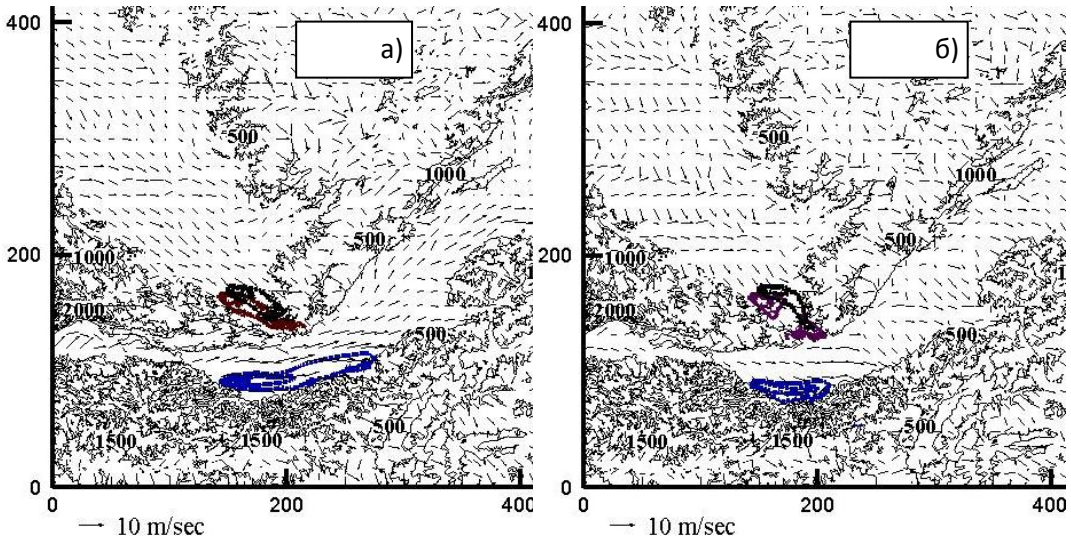


Рис. 2. Фрагмент области моделирования: а) устойчивая стратификация; б) – нейтральная. 10 часов местного времени

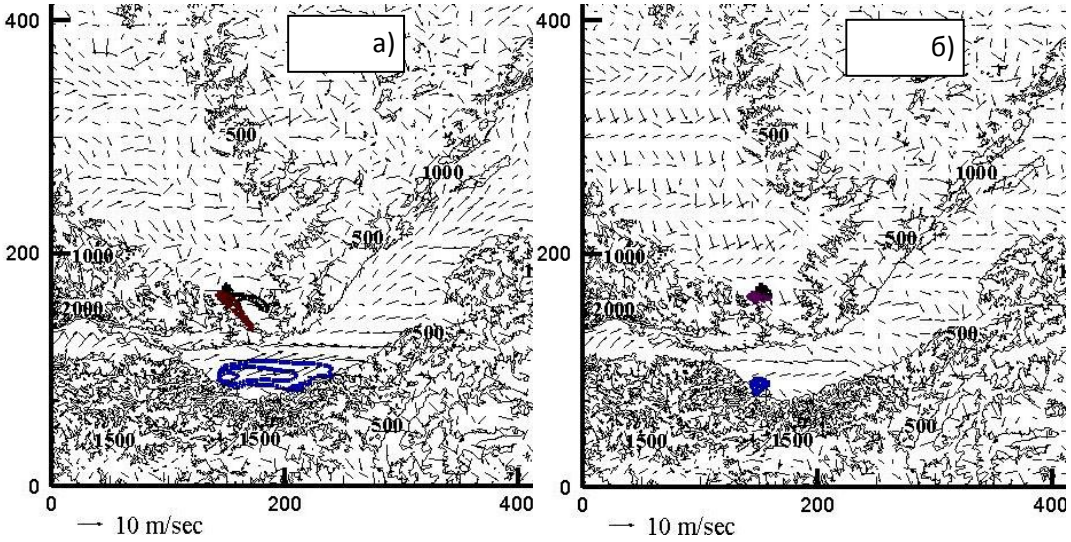


Рис. 3. То же самое, что и на рис. 2, но для12 часов местного времени

Полученное в расчетах поведение можно объяснить тем, что при нейтральной стратификации атмосферы, ветровые потоки, формирующиеся над Хамар-Дабаном и дующие с юго-запада, взаимодействуя над Байкалом с северо-западным фоновым потоком, разрушаются быстрее, чем при устойчивой стратификации, которая способствует формированию устойчивых струйных течений. Отсутствие устойчивого ветрового потока со стороны Хамар-Дабана при задании нейтральной стратификации хорошо прослеживается по поведению шлейфа от условного источника в Байкальске, расположенного на южном побережье Байкала (рис. 2б–4б).

Как показал анализ результатов сценарных расчетов, при северо-западном ветре устойчивая стратификация нижних слоев атмосферы для территории Южного Прибайкалья является неблагоприятным фактором, способствующим дальнему переносу примеси с возможностью достичь акватории Байкала. Эти

выводы согласуются с результатами наблюдений и численных экспериментов, сделанных другими исследователями [2]. Поскольку для Байкальского региона не только в летний, но особенно и в зимний период, характерны метеорологические ситуации, когда нижние атмосферные слои устойчиво стратифицированы, в том числе с инверсиями, то число неблагоприятных случаев по загрязнению Байкала сильно возрастает. Таким образом, вопрос о более детальном изучении условий, при которых вероятен перенос загрязнений на акваторию Байкала, остается актуальным [5].

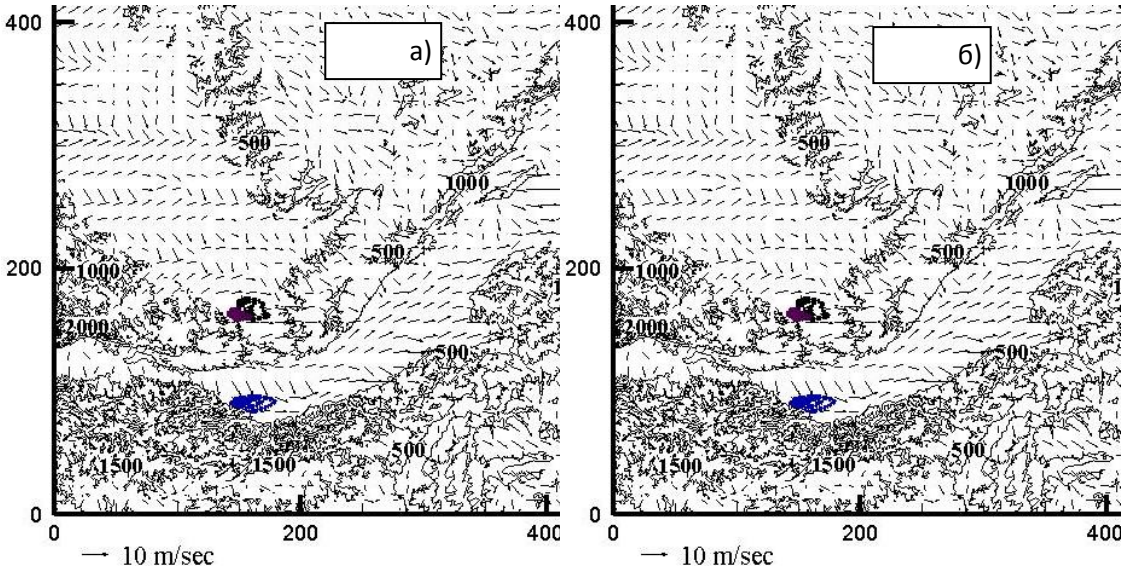


Рис. 4. То же самое, что и на рис.2, но для 20 часов местного времени

Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований № 43 Президиума РАН, проекта РФФИ № 14-01-00125-а. Расчеты выполнены на ССКЦ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pyanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. Simulation of atmospheric dynamics and air quality in the Baikal region // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929247 (November 25, 2014) [Electronic resource]. – Англ. – Режим доступа: http://dx.doi.org/10.1117/12.2074998.

2. Особенности пространственного распространения диоксида серы в Прибайкалье по данным маршрутных измерений и численных экспериментов / В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, В. Л. Макухин, Е. В. Чипанина, И. И. Маринайте // Метеорология и гидрология. – 2014. – №12. – С. 35–41.

3. Пьянова Э. А., Фалейчик Л. М. Информационно-вычислительная технология для сценарных оценок динамики и качества атмосферы // Вычислительные технологии. –2012. – Т. 17. – № 1. – С. 109–119.

4. Пьянова Э. А. Исследование трансформации воздушного потока над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью // Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10. – № S3. – С. 106–111.

5. Пененко В. В. О концепции природоохранного прогнозирования // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 6. – С. 432-438

© Э. А. Пьянова, 2015

УДК 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНО АНАЛИТИЧЕСКИХ СХЕМ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ КОАГУЛЯЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ СМОЛУХОВСКОГО

Алексей Владимирович Пененко
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

Алексей Александрович Сороковой
Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, аспирант, тел. (953)878-92-79, e-mail: AASorokovoy@mail.ru

В данной работе рассматривается применением метода дискретно-аналитических схем [1] для решения коагуляционного уравнения Смолуховского:

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{2}\int_0^x K(x-y,y)n(x-y,t)n(y,t)dy - \int_0^\infty K(x,y)n(x,t)n(y,t)dy\,.$$

Проводится сравнение известных точных решений этого уравнения с решениями, полученными разными вариантами метода дискретно-аналитических схем, а также с другими известными методами численного решения уравнения Смолуховского.

Ключевые слова: динамика аэрозолей, уравнение Смолуховского, дискретно-аналитические схемы.

APPLICATION OF DISCRETE ANALYTICAL APPROACH TO THE SOLUTION OF SMOLUCHOWSKI EQUATION

Alexey V. Penenko
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Ph. D., Junior researcher, tel. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

Alexey A. Sorokovoy
Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova Str., Ph. D., student, tel. (953)878-92-79, e-mail: AASorokovoy@mail.ru

In this paper considered the method of discrete analytic schemes [1] for solving the Smoluchowski equation of coagulation:

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{2}\int_0^x K(x-y,y)n(x-y,t)n(y,t)dy - \int_0^\infty K(x,y)n(x,t)n(y,t)dy\,.$$

Numerical solution obtained by discrete analytic schemes method compared with known exact solutions, and other known methods of numerical solution of the Smoluchowski equation.

Key words: aerosol dynamics, Smoluchowski equation, discrete analytic schemes.

На сегодняшний день уравнение Смолуховского является базовой моделью, которая описывает процесс бинарной коагуляции [2]. Модификации этого

уравнения нашли применение при описаниях самых различных явлений, таких как бактериальный рост, размеры особей стайных рыб, астрономические явления, эволюция аэрозольных составов, метеорологические явления. Известно лишь несколько аналитических решений данного уравнения, что не может покрыть все возникающие задачи. Поэтому разрабатываются численные методы решения уравнения Смолуховского, такие как: метод конечных элементов, метод конечных объёмов, метод последовательных приближений, метод моментов и методы Монте-Карло. Более подробный обзор имеется в работах Ватта [3] и Алдоса [4]. Сравнение численных методов подробно приводится в работе [5].

В данной статье мы реализуем идею, предложенную профессором В.В. Пененко - применим дискретно-аналитический метод получения численных схем, предложенный в работах [1,6,7,8]. Этот метод разработан для решений обыкновенных дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений и, в частности, коагуляционного уравнения Смолуховского. Известны результаты применения подобного подхода к решению других задач. В частности, методы типа QSSR для решения задач атмосферной химии и методы экспоненциального Рунге-Кутта, применяющиеся преимущественно для решения параболических уравнений.

Для проверки корректности работы и получения фактического порядка сходимости мы будем сравнивать полученное численное решение с известными точными решениями. Приведем их здесь.

1.1 Если $K(x,y)=1$, $n(x,0)=\exp(-x)$, то $n(x,t)=N^2(t)\exp(-N(t)x)$, где $N(t)=2/(2+t)$

1.2 Если $K(x,y)=xy$, $n(x,0)=\exp(-x)/x$, то $n(x,t)=\exp(-N(t)x)\dfrac{I_1(2xt^{0.5})}{x^2t^{0.5}}$,

где $N(t)=\begin{cases}1+t, t\le 1\\ 2t^{0.5}, t>1\end{cases}$, $I_1(x)=\dfrac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\exp(x\cos(\theta))\cos(\theta)d\theta$

1.3 Если $K(x,y)=x+y$, $n(x,0)=\dfrac{\exp(-x/2)}{2\pi x^{3/2}}\exp(-x)$, то

$$n(x,t)=\frac{\exp(-t)}{2\pi x^{3/2}}\exp(-\exp(-2t)x/2)$$

Для решения будем использовать численные схемы, построенные по методу построения дискретно аналитических схем из [1]. Основная идея метода заключается в том, чтобы использовать сопряженные интегрирующие множители, что позволяет «перенести сложность» из исходной системы на сопряженную функцию и, затем, пользуясь свободой ее выбора, упростить схему. В рамках данного подхода, уравнение Смолуховского может быть представлено в интегральной форме

$$\begin{cases} \psi(x,t) = \exp(-\int_t^T \int_0^\infty K(x,y)n(y,\xi)dyd\xi) \\ n(x,T) = n(x,0)\psi(x,0) + \int_0^T \psi(x,t)\frac{1}{2}\int_0^x K(x-y,y)n(x-y,t)n(y,t)dydt \end{cases}$$

Далее, различные вариации дискретно аналитических схем, строятся, в основном, как различные аппроксимации интегралов по времени в функциях $n(x,t), \psi(x,t)$.

Для построения дискретных схем, введем сетку дискретизации для данного уравнения, на области $x \in [X_{begin}, X] t \in [0,T]$ в виде равномерной сетки с шагом Δx по координате x всего N и шагом Δt по T. Далее Приведем ниже (без вывода) используемые нами схемы:

2.1 Схема первого порядка. В исходной системе заменим интегралы их дискретными аналогами, получим:

$$\begin{cases} \psi_1(x,0) = \exp(-\sum_{j=0}^{N} K(x,x_j)n_1(x_j,0)\Delta x\Delta t) \\ n_1(x_i,\Delta t) = n_1(x_i,0)\psi_1(x_i,0) + \psi_1(x_i,0)\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{i-1} K(x_i - x_j, x_j)n_1(x_i - x_j,0)n_1(x_j,0)\Delta x\Delta t \end{cases}$$

2.2 Схема типа QSSA первого порядка.

$$n_2(x_i,\Delta t) = n_2(x_i,0)\exp(-f_{21}(x_i)T) + \frac{1}{2} f_{22}(x_i)\frac{1-\exp(-f_{21}(x_i)\Delta t)}{f_{21}(x_i)},$$

где $f_{21}(x_i) = \sum_{j=0}^{N} K(x_i,x_j)n_2(x_j,0)\Delta x$, $f_{22}(x_i) = \sum_{j=1}^{i-1} K(x_i - x_j, x_j)n_2(x_i - x_j,0)n_2(x_j,0)\Delta x$

2.3 Схема второго порядка. Идея улучшения заключается в том, чтобы, вычислив по формулам 2.1 значение $n_1(x,T)$ при помощи него вычислить численное значение интеграла по формуле трапеции. Соответственно формулы 2.1 принимают вид:

$$\begin{cases} \psi_3(x_i,0) = \exp(-\sum_{j=0}^{N} K(x_i,x_j)\frac{n_3(x_j,0)+n_1(x_j,0)}{2}\Delta x\Delta t) \\ n_3(x_i,\Delta t) = n_3(x_i,0)\psi_3(x_i,0) + \\ \psi_3(x_i,0)\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{i-1} K(x_i - x_j, x_j)\frac{n_3(x_i - x_j,0)n_3(x_j,0) + n_1(x_i - x_j,0)n_1(x_j,0)}{2}\Delta x\Delta t \end{cases}$$

2.4 Схема типа QSSA второго порядка. Суть улучшения такая же, как и в 2.1-2.3 вычисляем по формуле 2.2. Значение $n_2(x,T)$ и используем его для аппроксимации исходного интеграла по формуле трапеции.

$$\begin{cases} \psi_4(x,0) = \exp(-(f_{41}(x) + f_{41}^{\Delta t}(x)\Delta t/2) \\ n_4(x_i,\Delta t) = n_4(x_i,0)\psi_4(x_i,0) + \frac{1}{2}(f_{42}^{\Delta t}(x_i) + \psi_4(x_i,0) f_{42}(x_i))\Delta t \end{cases},$$

где $f_{41}(x_i) = \sum_{j=0}^{N} K(x_i, x_j) n(x_j,0)\Delta x$, $f_{42}(x_i) = \sum_{j=1}^{i-1} K(x_i - x_j, x_j) n(x_i - x_j,0) n(x_j,0)\Delta x$

$$f_{41}^{\Delta t}(x_i) = \sum_{j=0}^{N} K(x_i, x_j) n_4(x_j,\Delta t)\Delta x,\ f_{42}^{\Delta t}(x_i) = \sum_{j=1}^{i-1} K(x_i - x_j, x_j) n_2(x_i - x_j,\Delta t) n_2(x_j,\Delta t)\Delta x$$

Для проверки описанные выше методики вычисления были реализованы на языке C++ и доступны в репозитории git [Репозиторий GIT]. URL: https://bitbucket.org/sorokovoy/aerosolsolver.git. (дата обращения: 12.03.2015). Полученные результаты приведены в следующих таблицах:

Таблица 1

Методы первого порядка

Δt	2.1-1.1	2.2-1.1	2.1-1.2	2.2-1.2	2.1-1.3	2.2-1.3
10^{-6}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-5}	10^{-5}
10^{-5}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-4}	10^{-4}
10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-3}
10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-2}	10^{-2}
10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-1}	10^{-1}
10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-1}	10^{-1}

Таблица 2

Методы второго порядка

Δt	2.3-1.1	2.4-1.1	2.3-1.2	2.4-1.2	2.3-1.3	2.4-1.3
10^{-6}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-5}	10^{-5}
10^{-5}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-4}	10^{-4}
10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-3}
10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-3}	10^{-3}
10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-2}	10^{-2}
10^{-1}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}

В строках табл. 1 и 2 указаны различные шаги по времени, используемые в эксперименте (из значения в колонке Δt). Во всех остальных колонках указаны результаты эксперимента, а именно ||{Точное решение} - {Численное решение}||/||{Точное решение}|| для результата полученного после 100 шагов по

времени. В заголовке указанно, какая схема применяется к какому условию по правилу {номер схемы}-{номер формулы известного точного решения}. В таблицах приводится только порядок полученной ошибки.

Заметим, что для методов второго порядка, фактический порядок сходимости, как видно из Таблицы 2, получается первым, что вероятнее всего говорит о проблемах с аппроксимацией интегралов внутри интегрального выражения по параметру t (Дополнительно ставился эксперимент, в котором разработанный алгоритм применялся к решению ОДУ. В данном случае для методов второго порядка, фактический порядок сходимости получился вторым) хотя, как видно из Таблицы 1 методы первого порядка, работают достаточно хорошо.

Благодарности: Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 14-01-31482, 14-01-00125 и программы Президиума РАН №43.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.Penenko, E.Tsvetova. Discrete-analytical methods for the implementation of variational principles in environmental applications // Journal of Computational and Applied Mathematics 226 (2009) 319-330.

2. В.М. Волощук, Ю.С. Седунов Процессы коагуляции в дисперсных системах. // Л.: Гидрометеоиздат,- 1975. -С. 435.

3. J. A. D. Wattis. An introduction to mathematical models of coagulation-fragmentation processes // A discrete deterministic mean-field approach. Phys. D Nonlinear Phenom., 222(1-2):1–20, Oct. 2006.

4. D. J. Aldous. Deterministic and Stochastic Models for Coalescence (Aggregation, Coagulation) // A Review of the Mean-Field Theory for Probabilists. Bernoulli, 5(1):3–48, 1999.

5. M. H. Lee. A survey of numerical solutions to the coagulation equation // J. Phys. A. Math. Gen., 34(47):10219–10241, Nov. 2001.

6. А. В. Пененко, “Дискретно-аналитические схемы для решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности слоистых сред градиентными методами” // Сиб. журн. вычисл. матем., 15:4 (2012), 393–408

7. В. В. Пененко, Е. А. Цветова, “Вариационные методы построения монотонных аппроксимаций для моделей химии атмосферы” // Сиб. журн. вычисл. матем., 16:3 (2013), 243–256.

8. Penenko, V.V., E.A. Tsvetova, A.V. Penenko, “Variational approach and Euler’s integrating factors for environmental studie” // CAMWA, 67, Issue 12, 2240–2256

© А. В. Пененко, А. А. Сороковой, 2015

УДК 504.064.36

ПРЯМОЙ ВАРИАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ АТМОСФЕРНОЙ ХИМИИ

Алексей Владимирович Пененко
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

В работе представлен алгоритм усвоения данных контактных измерений концентрации атмосферной химии моделью транспорта и трансформации примесей в атмосфере. Алгоритм основан на вариационном подходе и схеме расщепления, что позволяет избежать итераций решения прямой задач транспорта и трансформации примесей, т. е. алгоритм становится «алгоритмом реального времени».

Ключевые слова: усвоение данных, атмосферная химия, схема расщепления, вариационный подход, модель адвекции-диффузии-реакции.

DIRECT VARIATIONAL DATA ASSIMILATION ALGORITHM FOR ATMOSPHERIC CHEMISTRY DATA

Alexey V. Penenko
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Ph. D., Junior researcher, tel. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

An algorithm for chemical data assimilation for in situ concentration measurements has been presented. The algorithm is based on the variational approach and splitting scheme. This allows avoiding iterative direct problems solution for transport and transformation model and the algorithm becomes a «real-time algorithm».

Key words: data assimilation, atmospheric chemistry, splitting method, variational approach, advection-diffusion-reaction model.

Алгоритмы усвоения данных позволяют улучшать прогноз состояния системы на основе совместного использования математических моделей и поступающих данных наблюдений. Обзор методов усвоения данных можно найти в [1,2]. Обобщая его, отметим, что в отличие от усвоения данных в метеорологии, при усвоении химических данных влияние начального состояния системы на её дальнейшее поведение со временем убывает, тогда как влияние источников и параметров модели трансформации оказывают существенное влияние. В нашей работе мы используем неопределенность в источниках примесей в качестве управляющей переменной для усвоения данных. Целью работы является создание алгоритма усвоения данных, способного работать в реальном времени, то есть без итераций, включающих решение прямых задач транспорта и трансформации примесей.

Рассмотрим прямоугольную пространственно – временную область:

$$\vec{x} = (x_1, x_2) \in \Omega = [0, l_1] \times [0, l_2],\ t \in [0, T],\ \Omega_T := \Omega \times [0, T] \in \mathbb{R}^3,$$

ограниченную $\partial\Omega_T = \partial\Omega \times [0, T]$. В ней рассмотрим модель транспорта и трансформации системы химических веществ в атмосфере:

$$\frac{\partial \varphi_l}{\partial t} + div(\vec{u}\,\varphi_l - \mu\, grad\, \varphi_l) + P_l(\vec{\varphi})\varphi_l = \Pi_l(\vec{\varphi}) + \tilde{f}_l + r_l,\ (\vec{x}, t) \in \Omega_T. \quad (1)$$

$$\mu_1 \cos(n_1, x_1)\frac{\partial \varphi_l}{\partial x_1} + \mu_2 \cos(n_2, x_2)\frac{\partial \varphi_l}{\partial x_2} + \frac{\left|\langle \vec{n}, \vec{u} \rangle\right| - \langle \vec{n}, \vec{u} \rangle}{2}\varphi_l = g,\ (\vec{x}, t) \in \partial\Omega_T, \quad (2)$$

$$\varphi_l = \varphi_l^0, \vec{x} \in \Omega,\ t = 0, \quad (3)$$

где $\vec{\varphi} \in \mathbb{R}^{Nc}$ – вектор-функция состояния, различные элементы которой $\varphi_l,\ l = 1, ..., Nc$ соответствуют рассматриваемым химическим веществам, Nc – количество рассматриваемых веществ $P_l(\vec{\varphi}) > 0, l = 1, ..., Nc$ - коэффициенты деструкции рассматриваемых веществ, $\Pi_l(\vec{\varphi}) > 0, l = 1, ..., Nc$ – операторы продукции, $\vec{u} = (u_1(\vec{x}, t), u_2(\vec{x}, t))$ – вектор скоростей ветра, $\vec{\mu} = (\mu_1(\vec{x}, t), \mu_2(\vec{x}, t))$ - диагональ диагонального тензора диффузии, $\vec{n}$ направление внешней нормали на границе $\partial\Omega$, $\tilde{f}_l, g, \varphi_l^0$ – априорные значения источников и начальных данных r - управляющая функция (неопределенность), которая добавляется в жесткую структур модели для усвоения данных. Прямая задача состоит в том, чтобы определить $\vec{\varphi}$ из (1)-(3) по известным $\tilde{f}_l, g, \varphi_l^0, r$. Введем оператор H, соединяющий функцию состояния модели с данными измерений. Предположим, что нам доступны результаты контактных измерений концентраций $\{\Psi_m\}_{m=1,...,M}$ в заданные моменты времени $\{t_m\}_{m=1,...,M}$ в точках $\{\vec{x}_m\}_{m=1,...,M}$ для заданных веществ $\{l_m\}_{m=1,...,M}$. Измерения могут содержать погрешности $\{\eta_m\}_{m=1,...,M}$:

$$\Psi_m = \varphi_{l_m}(\vec{x}_m, t_m) + \eta_m,\ \ m = 1, ..., M. \quad (4)$$

Ошибка измерений η_m предполагается ограниченной во (взвешенной) Эвклидовой норме в пространстве измерений $\|\vec{\eta}\|_M \le \delta_{\vec{\eta}}$. Мы предполагаем, что все функции и модельные параметры достаточно гладкие, чтобы решения существовали и преобразования имели смысл. Задачу определения $\vec{\varphi}$ для $t > t^*$ по (1)-(3) и (4) при заданных функциях $\tilde{f}_l, g, \varphi_l^0$ и результатах измерений $\{\Psi_m\}_{m=1,...,M}$ таких, что $0 < t_m < t^*$ назовем задачей усвоения данных.

Для решения многомерных задач применяется метод расщепления. Мы будем использовать аддитивно усредненные схемы расщепления (аналогично [3]). Основная идея подхода состоит в том, чтобы усваивать данные локально на отдельных шагах расщепления. Вводя временную сетку $\omega_t = \ 0 < t_1 < ... < t_j < ... < t_{Nt} = T$. На каждом временном интервале $\left[t_{j-1}, t_j\right]$ приблизим общую модель конвекции-диффузии-реакции (1)-(3) схемой расщепле-

ния по физическим процессам и пространственным переменным, порожденной разбиением $\gamma_1+\gamma_2+\gamma_3=1,\ \gamma_k>0$.

Рассмотрим шаги расщепления, соответствующие одномерным по пространству моделям процессов транспорта

$$\gamma_k\frac{\partial\varphi_l^{(k)}}{\partial t}+\frac{\partial(u_k\varphi_l^{(k)})}{\partial x_k}-\frac{\partial}{\partial x_k}\mu_k\frac{\partial\varphi_l^{(k)}}{\partial x_k}=\gamma_k\tilde{f}_l+r_l^{(k)},\ \ \varphi_l^{(k)}(.,t_{j-1})=\varphi_l(.,t_{j-1}), \qquad (5)$$

при $k=1,2$ с соответствующими краевыми условиями. Введем в пространственной области сетку с узлами $\omega_x=(x_i,x_s)\,|\,i=1,...,Nx_1,s=1,...,Nx_2$. Будем считать, что точки измерений также взяты на сетке $\omega_x\times\omega_t$. Рассмотрим при k=1 и некотором заданном x_s аппроксимацию модели трехдиагональной неявной схемой:

$$-a_i\varphi_{i+1}^j+b_i\varphi_i^j=\varphi_{i-1}^{j-1}+f_i^{\,j}+\Delta t\,r_i^j,\ \ i=1 \qquad (6)$$

$$-a_i\varphi_{i+1}^j+b_i\varphi_i^j-c_i\varphi_{i-1}^j=\varphi_{i-1}^{j-1}+f_i^{\,j}+\Delta t\,r_i^j,\ \ i=2,...,Nx_k-1 \qquad (7)$$

$$b_i\varphi_i^j-c_i\varphi_{i-1}^j=\varphi_{i-1}^{j-1}+f_i^{\,j}+\Delta t\,r_i^j,\ \ i=Nx_k \qquad (8)$$

где $\varphi_i^j=\varphi_l^{(k)}(x_i,x_s,t_j)$, $f_i^{\,j}=\gamma_k\tilde{f}(x_i,x_s,t_j)$, $r_i^j=\gamma_k r_l^{(k)}(x_i,x_s,t_j)$. В качестве решения задачи усвоения данных рассмотрим минимум целевого функционала

$$\Phi(\varphi^j,r^j)=\sum_{i=1}^{Nx_k}(\varphi_i^j-\Psi_i^j)M_i^j+\alpha\sum_{i=1}^{Nx_k}r_i^j,$$

на ограничениях (6)-(8). Здесь α - параметр усвоения, $M_i^j=1$, если в узле с координатами (x_i,x_s,t_j) есть измерение вещества l, иначе $M_i^j=0$. Аналогично, Ψ_i^j равно результату измерения, если в узле с координатами (x_i,x_s,t_j) есть измерение вещества l, иначе оно равно 0. Решение задачи оптимизации для $k=1,2$ будет даваться матричным уравнением [4,5], которое можно решить прямым методом матричной прогонки

$$-A_i\Phi_{i+1}^j+B_i\Phi_i^j=F_i^{\,j},\ i=1, \qquad (9)$$

$$-A_i\Phi_{i+1}^j+B_i\Phi_i^j-C_i\Phi_{i-1}^j=F_i^{\,j},\ i=2,Nx_k-1 \qquad (10)$$

$$B_i\Phi_i^j-C_i\Phi_{i-1}^j=F_i^{\,j},\ i=Nx_k \qquad (11)$$

где

$$A_i=\begin{bmatrix}a_i & 0\\ 0 & c_{i+1}\end{bmatrix},B=\begin{bmatrix}b_i & -\Delta t\\ \dfrac{M_i^j\Delta t}{\alpha} & b_i\end{bmatrix},C_i=\begin{bmatrix}c_i & 0\\ 0 & a_{i-1}\end{bmatrix}$$

$$\Phi_i^j=\begin{bmatrix}\tilde{\varphi}_i^j\\ \tilde{\varphi}_i^{*j}\end{bmatrix},\ F_i^{\,j}=\begin{bmatrix}\varphi_{i-1}^j\\ \dfrac{M_i^j\Delta t}{\alpha}\Psi_i^j\end{bmatrix},\Delta t=t_j-t_{j-1}.$$

Аналогично решаются задачи на других этапах расщепления по пространству. Модель процессов трансформации

$$\gamma_k \frac{\partial \varphi_l^{(k)}}{\partial t} + P_l\ \vec{\varphi}^{(k)}\ \varphi_l^{(k)} = \Pi_l\ \vec{\varphi}^{(k)}\ + \gamma_k \tilde{f}_l + r_l^{(k)},\ \ \varphi_l^{(k)}(.,t_{j-1}) = \varphi_l(.,t_{j-1}),\ k = 3.$$

аппроксимируем схемой типа QSSR [6,7] для каждой $\vec{x} \in \omega_x$

$$\varphi_l^{(k)}(\vec{x},t_j) = \varphi_l(\vec{x},t_{j-1}) e^{-P_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ \Delta t} + \\ + \frac{1-e^{-P_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ \Delta t}}{P_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ \Delta t}\ \Pi_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ + \gamma_k \tilde{f}_l + r_l^{(k)}\ \ \Delta t. \tag{12}$$

В этом случае рассмотрим целевой функционал

$$\Phi(\vec{\varphi}^{(k)}\quad x_i, x_s\ , t_j\ , \vec{r}^{(k)}) = \sum_{l=1}^{Nc} (\varphi_l^{(k)}\quad x_i, x_s\ , t_j\ - \Psi_l) M_l + \alpha \sum_{l=1}^{Nc} r_l^{(k)}, \tag{13}$$

где $M_l = 1$, если в узле с координатами (x_i, x_s, t_j) есть измерение вещества l, иначе $M_i^j = 0$, аналогично, Ψ_l равно результату измерения, если в узле с координатами (x_i, x_s, t_j) есть измерение вещества l, иначе оно равно 0. Минимум (13) на ограничениях (12) дается выражением

$$\tilde{\varphi}_l^{(k)}(\vec{x},t_j) = \frac{\varphi_l(\vec{x},t_{j-1}) e^{-P_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ \Delta t} + \frac{1-e^{-P_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ \Delta t}}{P_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ \Delta t}\ \Pi_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ + \gamma_k \tilde{f}_l\ \ \Delta t}{1+Z} \\ + \frac{Z}{1+Z}\Psi,\ \ Z := \frac{M_l}{\alpha}\left(\frac{1-e^{-P_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ \Delta t}}{P_l\ \vec{\varphi}(\vec{x},t_{j-1})\ \Delta t}\right)^2.$$

В качестве оценки решения задачи усвоения данных на шаге t_j рассмотрим усреднение

$$\varphi_l(\vec{x},t_j) = \sum_{k=1}^{3} \gamma_k \tilde{\varphi}_l^{(k)}(\vec{x},t_j) \tag{14}$$

На рис. приведен пример решения задачи усвоения данных для одного из рассматриваемых химических веществ (в данном примере их 21), когда в модели, генерирующей «точное распределение концентраций» задан дополнительный источник, «неизвестный» для системы усвоения данных. Измерения 4х субстанций проводятся в 9ти точках пространственной области в каждый момент времени и поступают в алгоритм усвоения данных. Скорость ветра предполагается нулевой.

Таким образом, можно заключить, что задачи усвоения данных решаются с неполными данными. Недостаток информации компенсируется математической моделью. Совмещая схему расщепления и задачу усвоения данных можно построить вычислительно эффективный алгоритм для усвоения данных контактных измерений для моделей конвекции-диффузии-реакции, не требующий для своей реализации итераций.

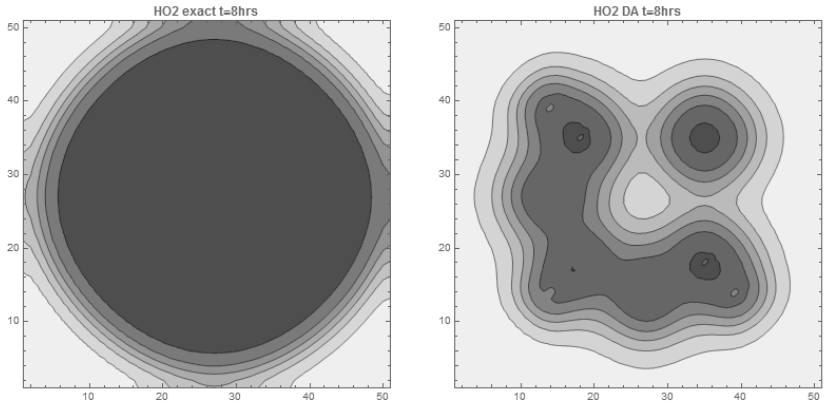


Рис. Сопоставление «точного решения» (слева) и решения задачи усвоения данных (справа) для одного из рассматриваемых веществ в заданный момент времени в пространственной области с 9 измерительными постами, фиксирующим значения концентраций 4х из 21 рассматриваемого вещества в каждый момент времени. Скорость ветра равна 0

Благодарности: Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 14-01-31482, 14-01-00125 и программы Президиума РАН №43.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baklanov A. et. al. Online coupled regional meteorology chemistry models in europe: current status and prospects // *Atmos. Chem. Phys.* – 2014 – (14) – С.317–398.

2. Sandu and C. Tianfeng. Chemical data assimilation - an overview // *Atmosphere* – 2011– (2) – С. 426–463.

3. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 785 с.

4. V. V. Penenko Variational methods of data assimilation and inverse problems for studying the atmosphere, ocean, and environment // Num. Anal. and Appl. – 2009 – No 4 (2) – С. 341-351.

5. А.В. Пененко, В.В. Пененко Прямой метод вариационного усвоения данных для моделей конвекции-диффузии на основе схемы расщепления // Вычислительные технологии – 2014 – №4(19) – С. 69-83.

6. Quasi-steady-state-approximation in air pollution modelling: comparison of two numerical schemes for oxidant prediction/ E. Hesstvedt, O. Hov, I. Isaacsen // *Int. J. Chem. Kinet.* – 1978 – (10) – С. 971-994.

7. V. V. Penenko and E. A. Tsvetova. Variational methods for construction of monotone appoximations for atmospheric chemistry models // Num. Anal. Appl –2013–6(3) – С. 210–220.

© А. В. Пененко, 2015

УДК 519.6+519.246+551.5

СОВМЕСТНАЯ ЧИСЛЕННАЯ СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СУТОЧНОГО СТОКА РЕКИ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПОЛЕЙ СУТОЧНЫХ СУММ ЖИДКИХ ОСАДКОВ

Вячеслав Александрович Шлычков
Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Морской, 2, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

Василий Александрович Огородников
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-77-56, e-mail: ova@osmf.sscc.ru

Ольга Владимировна Сересева
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)330-77-56, e-mail: seresseva@mail.ru

Построена приближенная численная стохастическая модель совместных пространственно-временных полей суточных сумм жидких осадков в районе водосбора реки Бердь и временных рядов суточного стока на заданном гидрологическом посту. Приведены примеры использования этой модели для оценки характеристик стока для различных сценариев выпадения осадков.

Ключевые слова: численные стохастические модели, поля суточных сумм осадков, суточный речной сток, условные численные стохастические модели.

JOINT NUMERICAL STOCHASTIC MODELS OF DAILY RIVER FLOW AND SPATIO-TEMPORAL FIELDS OF DAILY PRECIPITATION

Vyacheslav A. Shlychkov
Novosibirsk Division of Institute for Water and Environmental Problems of Siberian Branch of the RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Morskoy ave., Dr. Sci., Chief Researcher

Vasiliy A. Ogorodnikov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentieva, Dr. Sci., Chief Researcher, tel. (383)330-77-56, e-mail: ova@osmf.sscc.ru

Olga V. Sereseva
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentieva, Junior Researcher, tel. (383)330-77-56, e-mail: seresseva@mail.ru

An approximate numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of daily precipitation in the catchment area of Berd river and time series of daily river flow at the given hydrological station are constructed. Examples of the use of this model for estimation of some to characteristics of river flow for different scenarios of rainfall are given.

Key words: numerical stochastic model, daily precipitation fields, daily river flow, conditional numerical stochastic models.

В работе рассматриваются некоторые подходы к исследованию зависимости характеристик речного стока от дождевых осадков. Для этих целей строится параметрическая численная стохастическая модель совместных пространственно-временных полей суточных сумм жидких осадков в узлах регулярной сетки и рядов суточного речного стока в районе водосбора реки Бердь. Для построения модели были использованы синхронные данные об осадках на ряде станций Новосибирской области за период 1969-1983 гг., информация о структуре осадков из работы [1], а также данные с двух гидрологических постов на реке Бердь (посты Маслянино и Старый Искитим, на которых за этот же период, кроме измерений суточных расходов воды, проводились также измерения атмосферных осадков). Рассматривается также условная численная модель суточного речного стока (м. куб./сек.) при фиксированных осадках в рассматриваемой области. Алгоритм для моделирования условных реализаций суточного стока в момент времени t_2 при фиксированном поле сумм осадков в момент времени t_1 ($t_2 - t_1 = h\Delta t,\ h = 1,2,..,\ \Delta t = 1$ сут.) основан на методе условных распределений [3] с использованием совместной модели пространственно-временных полей суточных сумм жидких осадков и рядов суточного речного стока.

Модель полей осадков в стационарном приближении по времени и в приближении однородного поля по пространству для водосбора реки Бердь строится на основе метода обратных функций распределения, причем отсутствие осадков соответствует их нулевому количеству. Близкий подход к моделированию полей осадков в приближении изотропного поля по пространству и независимости процесса по времени с использованием индикаторов выпадения осадков и рассматривался в работе [2].

Специфика задания входных характеристик поля осадков состоит в том, что в данном районе имеется только два гидрологических поста, с данными о суточном водостоке и суточных осадках. Поэтому для описания корреляционной структуры поля осадков в этом регионе использована соответствующая корреляционная функция для региона, охватывающего западную часть Новосибирской области, который практически примыкает к рассматриваемому. Для описания корреляционной функции полей осадков для западной части Новосибирской области были использованы данные с 47 метеорологических станций. В качестве пространственной корреляционной функции была использована корреляционная функция вида

$$r(x, y) = \exp(-\alpha[ax^2 + bxy + cy^2]^{\theta}) \qquad (1)$$

из работы [4], параметры которой были оценены по данным с этих 47 станций. Характерной особенностью корреляционной функции является то, что главная ось эллипсов, представляющей изолинии этой корреляционной функции ориентированы в юго-западном направлении в соответствии с направлением преобладающих ветров, характерном для Новосибирской области. Эта особенность

корреляционной функции использовалась и для территории водосбора реки Бердь. При этом скорость убывания корреляционной функции определялась по данным наблюдений за осадками на имеющихся в этом районе двух гидрологических постах Маслянино и Старый Искитим. Изолинии полученной корреляционной функции приведены на рис. 1.

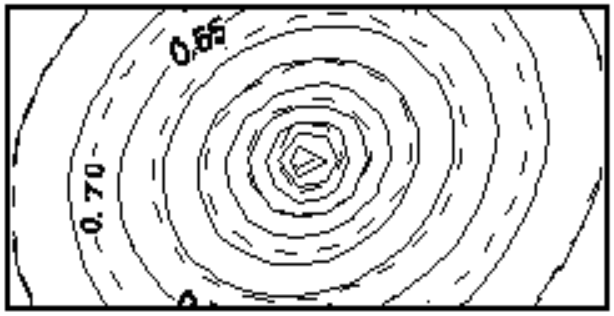


Рис. 1. Изолинии корреляционной функции поля суточных сумм жидких осадков для территории водосбора реки Бердь

Временные авто и взаимная корреляционные функции поля суточных сумм жидких осадков оценивались по данным с этих же двух гидрологических постов и приведены на рис. 2.

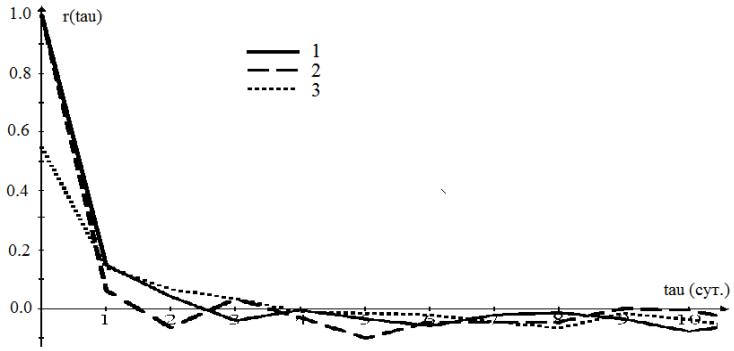


Рис. 2. Временные автокорреляционные функции -1,2 и взаимная корреляционная функция -3 суточных сумм жидких осадков на гидрологических постах Маслянино и Старый Искитим

Пространственно-временное гауссовское поле, которое на основе метода обратных функций распределения преобразуется в поле суточных сумм осадков строится с использованием алгоритма, основанного на представлении корреляционной матрицы пространственно-временного гауссовского поля в виде прямого произведения временной и пространственной корреляционных матриц [3], полученных с учетом корреляционной структуры полей осадков, характерной для Новосибирской области [2]. В качестве временной корреляционной матрицы использовалась матрица, построенная на основе корреляционной функции, полученной усреднением автокорреляционных функций на гидрологических постах Маслянино и Старый Искитим. На рис. 3 приведен пример реализации пространственно-временного поля осадков для области водосбора реки Бердь.

Построенная модель предназначена для решения задач, связанных с динамико-вероятностным моделированием речного стока. Полагая однозначной причинно-следственную связь в цепочке «осадки → поверхностный сток → русловый сток», можно трансформировать модельные осадки в сток. Для этих целей потребуется детерминированная модель формирования дождевого стока. Модельные данные о стоке будут служить средством получения искомых оценок характеристик стока – с одной стороны, и инструментом оптимизации параметров стохастического моделирования осадков – с другой.

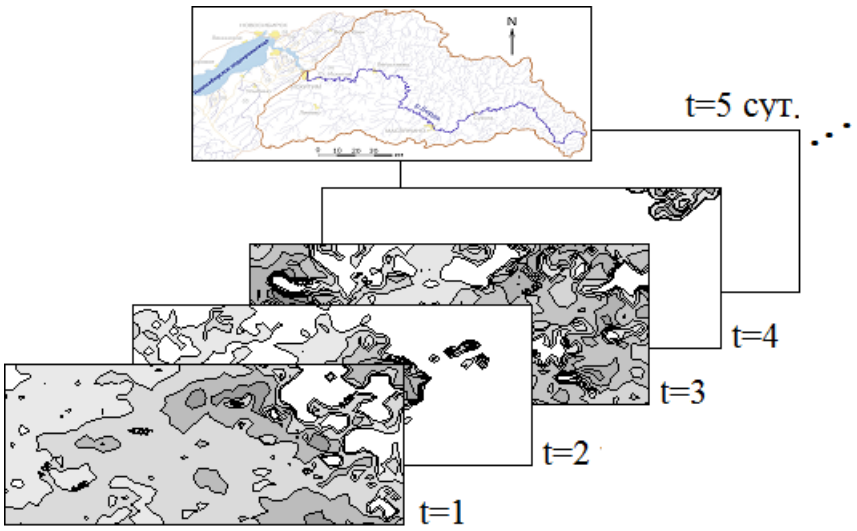


Рис. 3. Пример реализации пространственно-временного поля осадков для водосбора реки Бердь

К другому типу задач, для решения которых может быть использована построенная модель, относится задача совместного стохастического моделирования пространственно-временного поля суточных сумм осадков и временных рядов суточного стока с учетом их взаимных связей. Эти модель может быть использована, например, для оценки характеристик стока при различных сценариях выпадения осадков в предшествующие периоды времени. На рис. 4 приведен пример взаимной временной корреляционной функции суточных осадков и стока для станций Маслянино и Старый Искитим, вычисленной по имеющемуся на этих станциях объему выборки.

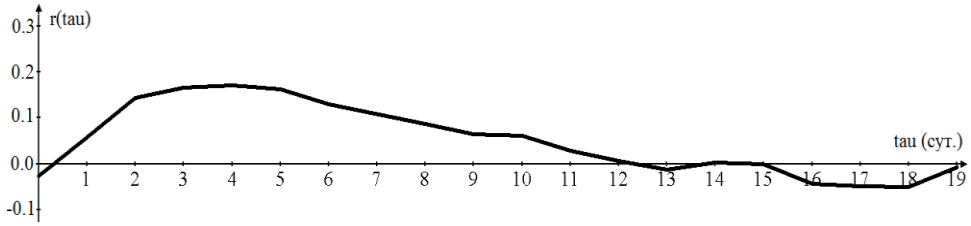


Рис. 4. Взаимная корреляционная функция суточных сумм жидких осадков на станции Маслянино и речного стока на станции Старый Искитим

В качестве примера рассмотрим совместную модель пространственного поля суточных сумм осадков, отнесенного к моменту времени t_1 и стока на одном из гидрологических постов, отнесенного к моменту t_2, $t_2 > t_1$. Удобно выбрать пространственную сетку таким образом, чтобы один из узлов сетки совпал с этим постом. Так как пространственная корреляционная функция поля осадков определена, то остается задать пространственные корреляционные связи осадков и стока. В простейшем случае эти связи можно задать в виде произведения функции (1), которая обеспечивает убывание корреляций расстояния, на некоторый коэффициент, который определяет уровень взаимной корреляции

осадков и стока. Выбором этого коэффициента можно регулировать интервал времени между двумя моментами t_1 и t_2, исходя из значения коэффициента корреляции между осадками и стоком.

На рис. 5 приведены условные средние и условные стандартные отклонения речного стока (м куб/сек) на станции Старый Искитим в момент времени t_2 в зависимости от среднего уровня осадков, выпавших на всей территории водосбора (мм) в момент t_1. Графики 1,2 соответствуют значению сдвига по времени $t_2 - t_1$ равному 3 суткам, а графики 3,4 – сдвигу по времени, равному 1 суткам.

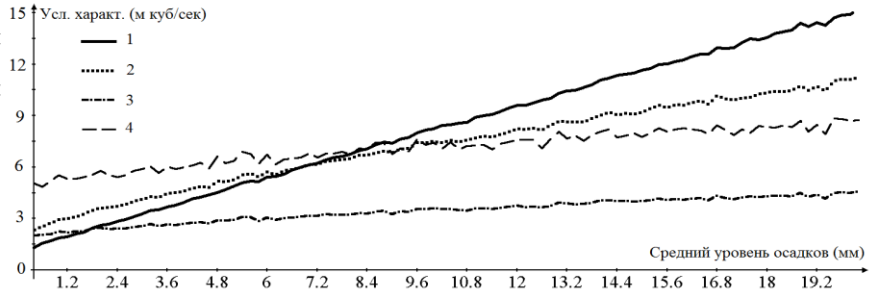


Рис. 5. Условные средние и условные стандартные отклонения речного стока на станции Старый Искитим в момент времени t_2 в зависимости от среднего уровня осадков, выпавших на всей территории водосбора в момент t_1

Условные средние и условные стандартные отклонения при фиксированных полях осадков на всей рассматриваемой территории как функции от среднего значения фиксированного поля оценивалась по 10 000 модельным реализациям условных величин стока реки Бердь на станции Старый Искитим. В расчетах использовались алгоритмы моделирования условных полей из работы [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 15-01-01458, 15-01-08988) и программы «Ведущие научные школы РФ» (НШ-5111.2014.1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКУИЙ СПИСОК

1. Дробышев А.Д., Марченко А.С., Огородников В.А., Чижиков В.Д. Статистическая структура временных рядов суточных сумм жидких осадков в равнинной части Новосибирской области//Труды ЗапСибНИИ Госкомгидромета. 1989. Вып. 86. С. 44–66.

2. Kliber, W., R. W. Katz, and B. Rajagopalan (2012), Daily spatiotemporal precipitation simulation using latent and transformed Gaussian processes, Water Resour. Res., 48, W01523, doi:10.1029/2011WR011105.

3. Ogorodnikov V.A. and Prigarin S.M. Numerical Modelling of Random Processes and Fields: Algorithms and Applications. VSP. Utrecht. The Netherlands. 1996. 240 p.

4. V.A. Ogorodnikov, N.A. Kargapolova and O.V. Sereseva. Numerical stocastic model of spatial fields of daily sums of liquid precipitation// RJNAMM, 2013, vol. 28, № 2, pp. 187-200.

© В. А. Шлычков, В. А. Огородников, О. В. Сересева, 2015

УДК 551.465+519.63

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНОЙ МЕРЗЛОТЫ ШЕЛЬФА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Валентина Владимировна Малахова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (913)892-70-69, e-mail: malax@sscc.ru

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования эволюции подводной мерзлоты на арктическом шельфе Восточной Сибири для последнего ледникового цикла 120 тыс. лет. По результатам экспериментов современная субаквальная мерзлота распространена от береговой линии до изобаты 120 м и имеет мощность 200–440 м при геотермическом потоке тепла 60 мВт/м^2. Сделана оценка влияния процессов солепереноса на динамику оттаивания подводной мерзлоты и скорость опускания ее верхней границы.

Ключевые слова: Восточно-Сибирский шельф, криолитозона Арктического шельфа, зона стабильности газогидратов, субаквальная мерзлота, подводная мерзлота.

MODELING OF CURRENT STATE OF THE SUBSEA PERMAFROST OF THE EAST SIBERIAN SHELF

Valentina V. Malakhova
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Pr. Acad. Lavrentieva, Ph. D. of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, tel. (913)892-70-69, e-mail: malax@sscc.ru

We have numerically simulated the subsea permafrost evolution in the East Siberia Arctic shelf for the last glacial cycle, namely, 120 kyr. Submarine permafrost contemporary widespread from the coastline to 120 m isobaths and the thickness of permafrost on the shelf is 200–440 m for the geothermal heat flux 60 mW/m^2 on the results of experiments. We have estimated the effect of the salt transport on the dynamics of subsea permafrost thawing in this paper.

Key words: East Siberian shelf, cryolithozone of the Arctic shelf, methane hydrate stability zone, subsea permafrost, submarine permafrost.

Изучение происхождения, состояния и динамики субаквальных мерзлых пород на шельфе арктических морей представляет большой интерес, особенно в условиях меняющегося климата. Деградация подводной мерзлоты и нарушение условий существования шельфовых газогидратов могут привести к выбросу огромных количеств метана в атмосферу этого региона [1, 2]. Стабильность подводной криолитозоны в условиях изменения климата напрямую зависит от величины изменения температуры и солености воды, температуры воздуха, толщины морского льда. Значимую роль для современного состояния субаквальной мерзлоты играет температура придонного слоя воды, определяющая глубину протаивания. Если температура придонных вод выше 0ºС, реликтовые мерзлые толщи могут протаивать полностью, либо частично.

Данные наблюдений в летний период с 1984 по 2009 год демонстрируют рост температуры придонных вод в морях восточной Арктики до устойчиво положительных значений [3]. Совершенно очевидна необходимость изучения взаимосвязей между субаквальной мерзлотой и термохалинным состоянием вод морей Арктики, чтобы иметь возможность прогнозировать динамику криолитозоны и оценивать масштаб эмиссии парниковых газов, высвобождающихся при ее разрушении.

В настоящей работе представлены результаты математического моделирования динамики толщи субаквальных мерзлых пород Восточно-Сибирского шельфа (ВСШ) с учетом рассчитанной на основе модели Северного Ледовитого океана - Северной Атлантики (СЛО-СА) температуры придонной воды для 1948-2012 гг. [4, 5]. Для расчёта теплопереноса в грунте использовалась модель мерзлоты, разработанная в ИФА РАН [6], адаптированная для случая донных отложений.

Предполагается, что подводная мерзлота Восточно-Сибирского шельфа, сформировалась на суше в холодную эпоху во время отступания моря. Причинами регрессий и трансгрессий Арктического бассейна считают гляциоэвстатические колебания уровня Мирового океана [7-9]. Огромная площадь шельфа с глубинами до 100-120 м в ледниковые периоды была сушей. На ней в результате промерзания под воздействием низкой температуры атмосферы сформировалась мерзлота. В дальнейшем, в ходе последующих трансгрессий океана, примерно 5-13 тысяч лет назад, произошло затопление мерзлых отложений. Для исследования динамики мерзлоты и определения ее мощности используется палеогеографический сценарий, учитывающий изменения уровня океана и формирование мерзлых толщ в субаэральных условиях. Такой длительный период берется, чтобы исключить влияние начальных условий, а также получить картину более длительного этапа динамики мерзлых толщ на шельфе. Более подробное описание используемой модели подводной мерзлоты и детали палеогеографического сценария представлены автором ранее в работе [10, 11].

Пресные грунты шельфа после затопления морем подвергались засолению, и процессы оттаивания донных отложений могут проходить при отрицательной температуре пород. И лишь на некоторой глубине от поверхности дна моря соленость может соответствовать температуре замерзания. Действительно, температура замерзания засоленных отложений или поровых вод ниже 0ºС и понижается с возрастанием солености. Поэтому при отрицательных температурах донные отложения из мерзлого состояния могут переходить в охлажденное состояние, образую горизонты, не содержащие льда. В настоящем исследовании учитывается влияние солености поровых вод на интенсивность разрушения мерзлых пород на шельфе морей восточной Арктики, которое было не учтено в предыдущих расчетах [10, 11].

Результаты численного моделирования показали возможность существования подводной мерзлоты на ВСШ. По результатам экспериментов современная субаквальная мерзлота распространена от береговой линии до изобаты 120 м и имеет мощность 200 - 440 м. В первом эксперименте S0 при моделиро-

вании динамики субаквальной мерзлоты с 1948 по 2012 год не учитывалось влияние солености на температуру замерзания поровых вод. Мерзлота представляет собой монолит несоленых донных отложений с температурой замерзания 0ºС. Протаивание мерзлых толщ со стороны морского дна происходит очень медленно, что обусловлено отрицательными температурами придонного слоя воды на шельфе в зимний период. Скорость протаивания мерзлых пород в эксперименте S0 составила порядка 1 см в год для южной части моря Лаптева. При этом скорости деградации верхних горизонтов мерзлоты неодинаковы в разных частях шельфа.

В экспериментах S10 и S30 была проведена оценка влияния солености поровых вод в верхнем 10-30 метровом слое грунта на динамику оттаивания мерзлой толщи. В случае S10 механизм промерзания верхнего 10 м донных отложений зависит от соотношения между соленостью и температурой поровых вод осадков предложенным в [12]. Считается, что с глубиной соленость заметно снижается, и в интервале 0-10 м под дном температура замерзания поровых вод задается с учетом солености, увеличиваясь от -1,8 до 0ºС. Скорость деградации мерзлоты и опускания ее верхней границы в эксперименте S10 составила порядка 6,5 см в год для южной части моря Лаптева. Верхняя граница слоя мерзлых отложений на ВСШ опустилась на 0 – 5,5 м от дна моря в зависимости от области шельфа, см. рис.

Результаты бурения донных отложений показали, что морское засоление проникает на глубины более 20 м ниже дна. В случае эксперимента S30 задавалось распределение солености от 32 ‰ до 0 в верхнем 30 метровом слое донных отложений, в соответствии с [13]. Температура замерзания поровых вод определялась с учетом солености (S): $Tf = -0{,}054 \cdot S$.

Скорость деградации мерзлоты составила порядка 7 см в год для южной части моря Лаптева, что незначительно отличается от результатов эксперимента S10. При этом произошло увеличение слоя охлажденных пород до 9 м, см. рис. Результаты моделирования показали, что температурный режим подводной мерзлоты и ее целостность зависят от солености донных отложений. Субаквальная мерзлота в верхнем слое деградирует и при отрицательных температурах донных отложений под воздействием солей в поровых водах.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования состояния подводной мерзлоты на арктическом шельфе Восточной Сибири с учетом изменения температуры придонной воды с 1948 по 2012 год. Проведенные сценарные расчеты показали возможность существования субаквальных мерзлых пород в донных отложениях по всей области ВСШ. Мощность мерзлого слоя под дном зависит от глубины моря и может составить порядка 200-440 м при заданном тепловом потоке 60 мВт/м^2.

Расчет с учетом климатических изменений до 2012 года показал, что температура придонного слоя морской воды является важным фактором, влияющим на современное состояние субаквальной мерзлоты. Однако, большая интенсивность и глубина протаивания мерзлых донных отложений обусловлена их засолением вследствие миграции солей в поровое пространство после затоп-

ления шельфа. Учет солености имеет существенное значение в темпах деградации верхнего слоя мерзлых пород на шельфе и может быть доминирующим фактором.

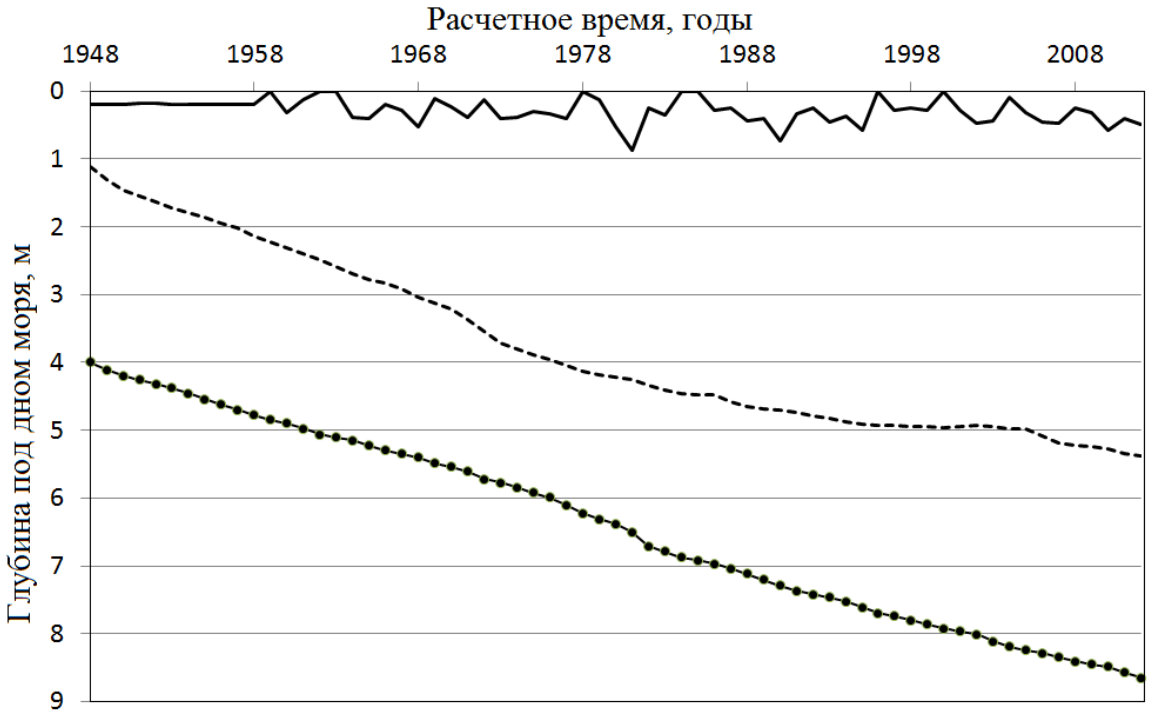


Рис. Результаты моделирования для устьевой зоны р. Лена, изменение положения верхней границы субаквальной мерзлоты с 1948 по 2012 год, в м: сплошная линия – по результатам эксперимента S0, пунктирная линия – S10; маркерованная линия – S30

Проведенные модельные расчеты показали, что современного потепления недостаточно для полной дестабилизации подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Опускание границы мерзлых осадков к 2012 году составило порядка 0-9 м в зависимости от области шельфа и рассматриваемого сценария. Увеличение глубины протаивания может приводить к усилению процессов метаногенеза в осадочном слое и давать дополнительные потоки метана на дне [1, 2].

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ (№ 14-05-00730 А, № 15-05-02457 А) и Минобрнауки России ПНИЭР RFMEFI61014X0006.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малахова В.В., Голубева Е.Н. О возможной эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Оптика атмосферы и океана. – 2013. Т. 26, № 06. С. 452–458.

2. Shakhova, N., Semiletov, I., Leifer, I., Rekant, P., Salyuk, A., and Kosmach, D.: Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // J. Geo-phys. Res. 2010. V. 115, C08007, doi:10.1029/2009JC005602.

3. Dmitrenko I., Kirillov S., Tremblay L., Kassens H., Anisimov O., Lavrov S., Razumov S., Grigoriev M. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability // J. Geophys. Res. 2011. V.116. C10027, doi:10.1029/2011JC007218.

4. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948 – 2007 гг. // Известия РАН, серия ФАО. 2009. Т.45. № 1. С.145 -160.

5. Кузин В.И., Платов Г.А., Голубева Е.Н., Малахова В.В. О некоторых результатах численного моделирования процессов в Северном Ледовитом океане // Известия РАН. ФАО. - 2012.- Том 48. - № 1. С.117-136.

6. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 86–93.

7. Romanovskii N. N., Hubberten H.W., Gavrilov A. V., Eliseeva A. A., Tipenko G. S. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo Mar. Lett.2005.V. 25. P. 167–182, doi:10.1007/s00367-004-0198-6.

8. Delisle G. Temporal variability of sub-sea permafrost and gas hydrate occurrences as function of climate change in the Laptev Sea, Siberia // Polarforchung. 2000. V.68. P.221–225.

9. Nicolsky D.J., Romanovsky V. E., Romanovskii N.N., Kholodov A.L., Shakhova N.E., Semiletov I.P. Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea region // J. Geophys. Res. 2012. V.117. F03028, doi:10.1029/2012JF002358.

10. Малахова В. В. Математическое моделирование многолетней динамики подводной мерзлоты Арктического шельфа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 136–140.

11. Malakhova V.V., Golubeva E.N. Modeling of the dynamics subsea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf under the past and the future climate changes // Proceedings of SPIE. 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929246. (November 25, 2014) doi: 10.1117/12.2075137

12. Шполянская Н.А. Мерзлотно-экологическая характеристика западного сектора Российского Арктического шельфа // Известия Коми научного центра УрО РАН. Сыктывкар, 2014. Выпуск 3. №19. С.105-111.

13. Разумов С.О., Спектор В.Б., Григорьев М.Н. Модель позднекайнозойской эволюции криолитозоны шельфа западной части моря Лаптевых // Океанология. 2014. Т.54. № 5. С.679-693.

© В. В. Малахова, 2015

УДК 551.511.42.001.572(571.14)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ ИСКИТИМСКОГО ЦЕМЕНТНОГО ЗАВОДА

Анатолий Александрович Леженин
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru

Владимир Федотович Рапута
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Татьяна Владимировна Ярославцева
ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Ирина Алексеевна Соловьёва
Сибирский центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "ПЛАНЕТА"», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, заведующий отделом, тел. (383)222-33-07, e-mail: sol@rcpod.ru

С использованием данных спутникового зондирования загрязнения снежного покрова и метеорологических наблюдений изучены поля выпадения пыли от высотных труб Искитимского цементного завода. Установлено существенное влияние рельефа местности на трансформацию поля ветра в нижних слоях атмосферы и формирование доминирующих направлений выноса тяжёлой неоднородной примеси от промышленного предприятия.

Ключевые слова: загрязнение снежного покрова, аэрозоль, спутниковые наблюдения, численное моделирование, атмосфера, рельеф.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF OROGRAPHY ON THE DISTRIBUTION OF DUST EMISSIONS FROM THE ISKITIM CEMENT PLANT

Anatoly A. Lezhenin
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 pr. Akad. Lavrentjeva, senior researcher, tel. (383)330-64-50, e-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru

Vladimir F. Raputa
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 pr. Akad. Lavrentjeva, principal researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Tatyana V. Yaroslavtseva
FGUN «Novosibirsk scientific research institute of hygiene» Rospotrebnadzora, 630108, Russia, Novosibirsk, 7 Parhomenko st., senior researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: tani-ta@list.ru

Irina A. Solov´eva
Siberian Center of FGBU State Research Center «Planeta», 630099, Russia, Novosibirsk, 30 Sovetskay st., head of department, tel. (383)222-33-07, e-mail: sol@rcpod.ru

With satellite data on the pollution of snow cover and meteorological observations data the dust sedimentation fields from high chimneys of the Iskitim cement plant are studied. It is shown, that the influence of orography on the wind fields in the lower layers of the atmosphere and on the propagation of a heavy non-homogenous substance from the industrial enterprise is considerable.

Key words: pollution, snow cover, aerosol, numerical modeling, satellite images, atmosphere, orography.

1. Введение.

В настоящее время для описания процессов переноса атмосферных загрязнителей широко используются методы математического моделирования [1 - 3]. Для орографически однородной местности применение этих методов значительных затруднений не представляет. В случае неоднородных условий описание процессов распространения примесей существенно усложняется и требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

2. Объекты и материалы исследований.

Объектами исследования являются выбросы загрязняющих веществ от высотных источников Искитимского цементного завода, выпадения пыли на снежный покров в его окрестностях, спутниковые снимки ареалов загрязнения, “розы ветров”, рельеф местности.

Город Искитим находится в юго-восточной части Новосибирской области в 55 км от областного центра – города Новосибирска. Цементный завод расположен в северной части города. С севера и востока к промплощадке предприятия примыкает р. Бердь. Основными источниками выброса неорганической пыли в атмосферу являются две близко расположенные 80 метровые трубы с диаметрами 6 метров в верхней части.

Территория Искитимского района представляет собой переход от Приобского плато на западе к предгорной более возвышенной равнине и далее на восток к отрогам Салаира. Абсолютные отметки высот колеблются от 100 до 350 метров. Рельеф сильно расчленен притоками Оби, а также оврагами, увалами, балками.

На рис. 1 представлена схема рельефа местности окрестностей г. Искитима. Анализ этого рисунка показывает, что особенности рельефа данной местности могут оказывать заметное влияние на процессы распространения газовых и аэрозольных примесей в нижних слоях атмосферы.

2. Методы исследования.

На формирование полей длительного загрязнения территории в окрестностях промышленного предприятия оказывают влияние множество факторов. Среди них определяющими являются такие, как расположение и высота источников примеси, характеристики газового и дисперсного состава выбросов, метеорологические условия, рельеф местности и др. Адекватное описание этих

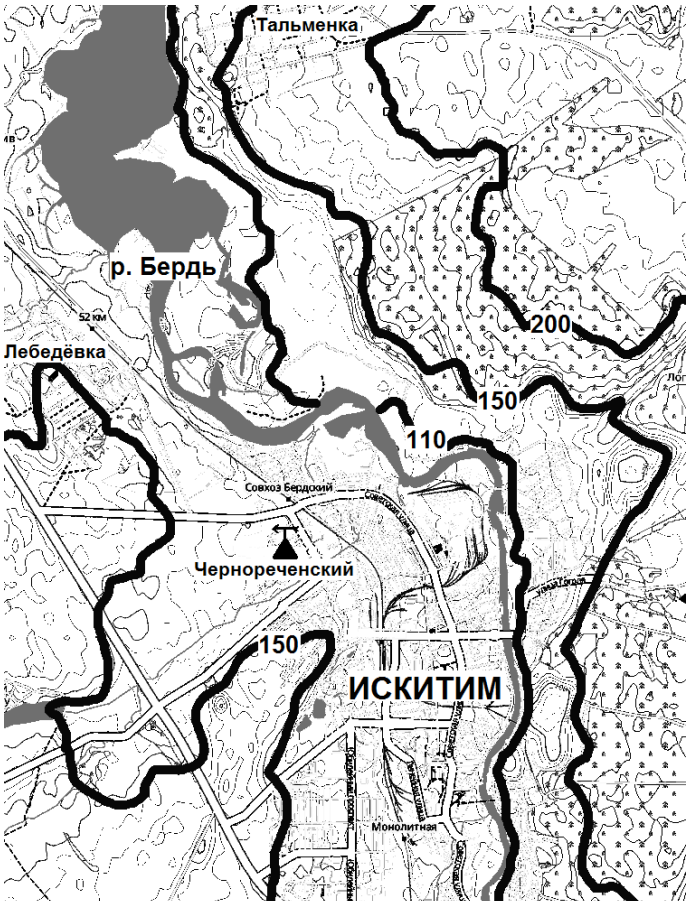


Рис. 1. Схема рельефа местности

– положение метеостанции г. Искитима

условий для целей численного моделирования процессов загрязнения, в большинстве случаев, проблематично и результаты расчетов зачастую носят сценарный характер.

В этой связи для полноты картины необходим мониторинг состояния загрязнения окружающей среды. Инструментальные исследования загрязнения атмосферного воздуха требуют значительных материальных затрат и носят эпизодический характер. Более экономичными методами является использование природных планшетов: почвенный, растительный и снежный покровы, а также данных дистанционного зондирования Земли.

В зимние периоды 2012/13 г. и 2013/14 г. были проведены масштабные исследования пылевого загрязнения снежного покрова в окрестностях Искитимского цементного завода [4, 5]. Результаты численного анализа данных наблюдений показали, что основные выпадения пыли произошли в северо-западном направлении от промплощадки завода, по долине р. Бердь. При этом в соответствующих зимних розах ветров преобладали ветры южного и юго-западного направлений.

3. Результаты и обсуждения.

Эффективным методом визуализации пространственной картины поля выпадения пыли на снежный покров являются спутниковые наблюдения. На спутниковом снимке от 7 февраля 2014 г. (рис. 2) отчетливо прослеживается ареал загрязнения снежного покрова в окрестностях Искитимского цементного завода. Близкорасположенная метеорологическая станция не фиксировала выпадение осадков в предшествующие 8 дней. Следовательно, шлейф загрязнения, видимый на космическом снимке, мог сформироваться за интервал времени с 30 января по 7 февраля.

На рис. 3 представлены диаграммы повторяемостей направлений и скоростей ветра именно за этот период времени. Данный период времени характеризуется низкими температурами воздуха, штилевыми условиями (10 % случаев), слабыми ветрами и доминирующими (более 70% случаев) южными и юго-западными направлениями ветра.

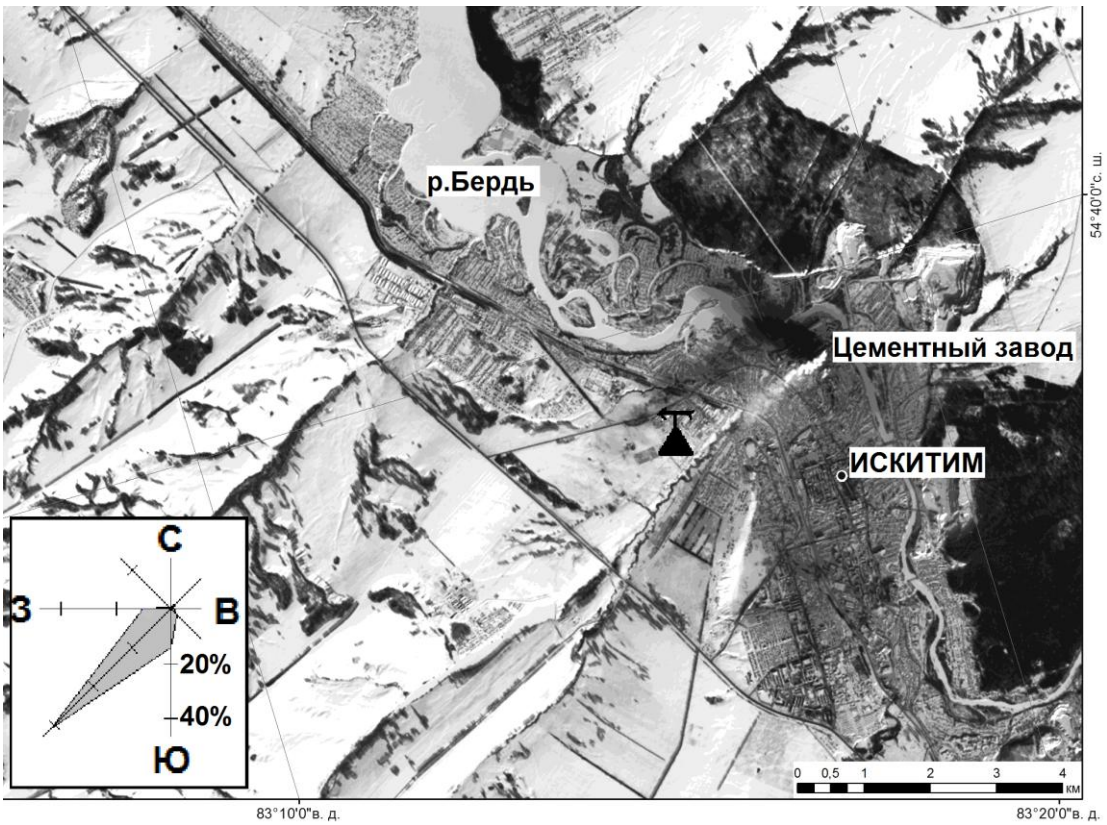


Рис. 2. Спутниковый снимок окрестностей Искитимского цементного завода от 7 февраля 2014 г. (ИСЗ «Landsat-8»). В левом нижнем углу - повторяемость направлений ветра в период с 30 января по 7 февраля 2014 г.

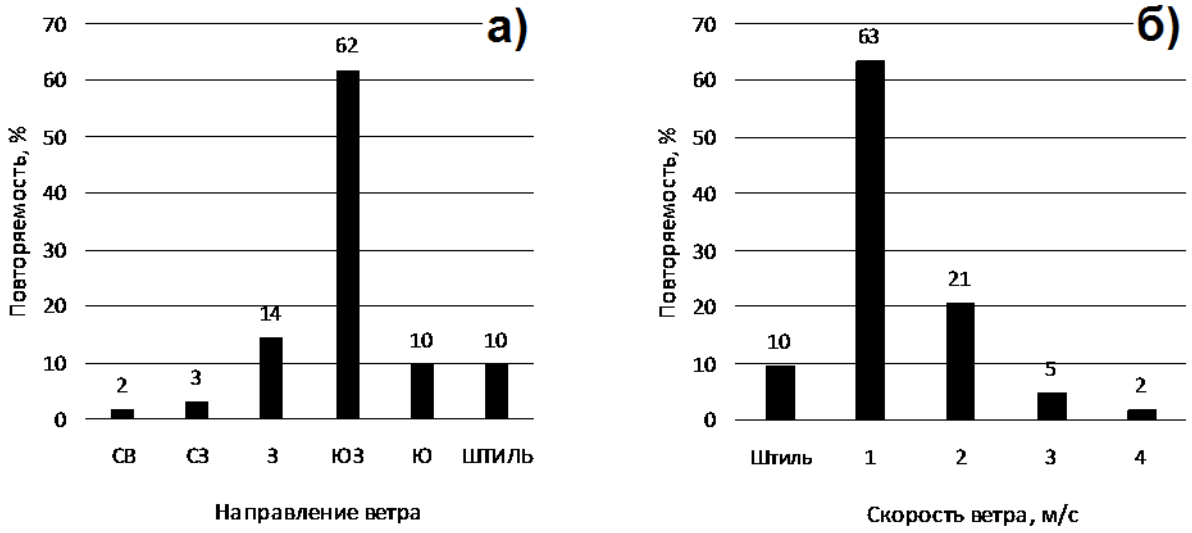


Рис. 3. Повторяемость направлений (а) и скоростей ветра (б) на метеорологической станции Искитим в период 30 января - 7 февраля 2014 г.

Исходя из данных метеонаблюдений, основное загрязнение прилегающей местности пылевыми выбросами можно было ожидать в северном и северо-восточном секторах от заводских труб. Спутниковые наблюдения (рис. 2) пока-

зывают, что основные выпадения загрязняющих примесей произошли в северо-западном направлении от цементного завода. Это объясняется орографическими неоднородностями местности, наличием возвышенных форм рельефа в правобережье р. Бердь и устойчивой температурной стратификацией в нижней атмосфере.

Анализ данных мониторинга загрязнения снежного покрова за зимние периоды 2012-2014 гг., показал аналогичную картину [4, 5]. След загрязнения простирается в северо-западном направлении от промплощадки завода, хотя при этом также преобладали ветры юго-западного и южного направлений.

4. Заключение.

С использованием данных метеорологических наблюдений и спутниковых снимков загрязнения снежного покрова установлено существенное влияние рельефа местности на формирование полей выпадения пыли от высотных труб Искитимского цементного завода. Несмотря на преобладание юго-западных и южных ветров, измеренных на метеостанции г. Искитим, основной вынос загрязняющей примеси произошел в направлении на северо-запад, вдоль долины р. Бердь. Это означает, что в данном случае формальное использование данных с метеостанции в общепринятых методиках расчетах полей загрязнений, например ОНД-86 [6], приводит к ошибочным результатам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 4.9-З.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. - Л.: Гидрометеоиздат, 1991. - 278 с.

2. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. - Л.: Гидрометеоиздат, 1985. - 351 с.

3. Алоян А.Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. – М.: Наука, 2008. – 415 с.

4. Щербатов А.Ф., Рапута В.Ф., Турбинский В.В., Ярославцева Т.В. Оценка загрязнения атмосферного воздуха пылью по данным снегосъёмки на основе реконструкции полей выпадений // Анализ риска здоровью. 2014. № 2. С. 42-47.

5. Щербатов А.Ф., Рапута В.Ф., Турбинский В.В., Хмелёв В.А., Олькин С.Е., Ярославцева Т.В. Мониторинг загрязнения снежного покрова в районе Искитимского цементного завода // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 163–168.

6. Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86 / Под ред. М.Е. Берлянда, Н.К. Гасилиной, Е.Л. Гениховича и др. – Л: Гидрометеоиздат, 1987. - 94 с.

© А. А. Леженин, В. Ф. Рапута, Т. В. Ярославцева, И. А. Соловьёва, 2015

УДК 551.511.32: 532.517.4

МЕЗОМАСШТАБНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА В УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Людмила Ивановна Курбацкая
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: L. Kurbatskaya@omgp.sscc.ru

Альберт Феликсович Курбацкий
Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-78-05, e-mail: kurbat@itam.nsc.ru

В работе исследована вычислительная эффективность трехпараметрической теории турбулентного переноса импульса и тепла для моделирования структуры циркуляционного течения над поверхностным источником тепла (городским островом тепла). Результаты численного моделирования показывают, что трехпараметрическая теория позволяет получить структуру циркуляции, которая хорошо согласуется с данными измерений.

Ключевые слова: турбулентность, атмосфера, вихревые коэффициенты диффузии, моделирование.

MESOSCALE NUMERICAL MODEL OF URBAN HEAT ISLAND IN STABLY STRATIFIED ENVIRONMENT

Lyudmila I. Kurbatskaya
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentieva, senior scientific researcher, tel. (383)330-61-52, e-mail: L. Kurbatskaya@ommgp.sscc.ru

Albert F. Kurbatskiy
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 630090, Russia, Novosibirsk, 4/1 Institutskaya Str., D. Sc. (Phys. and Math.), principal scientific researcher, tel. (383)330-78-05, e-mail: kurbat@itam.nsc.ru

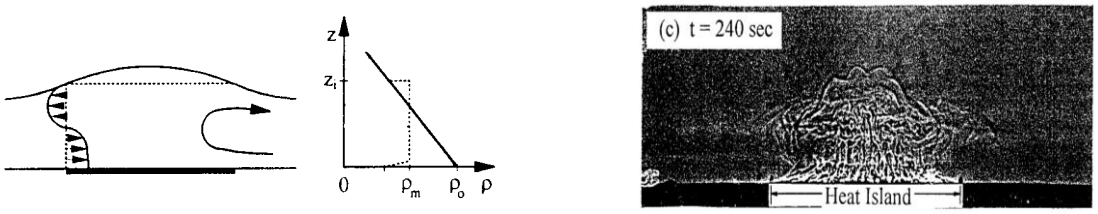
In this paper, computing efficiency of the three-parametrical theory of turbulent transport of a momentum and heat for modelling of structure of a circulating flow over a surface heat source (urban heat island) is investigated. The results of numerical modelling show that the three-parametrical theory allows to receive structure of circulation, which good agreement with the measurements data.

Key words: turbulence, atmosphere, eddy diffusivities, modelling.

Градиентные модели вихревой диффузии для турбулентных потоков, включающие эффекты плавучести, могут быть оптимальным приближением, сочетающем в себе вычислительную эффективность с приемлемой точностью получаемых результатов [1–2].

В настоящей работе представлены численные результаты основных характеристик проникающей турбулентной конвекции в идеализированной модели городского острова тепла, реализованной в лабораторном эксперименте [3].

В лабораторном эксперименте [3] проникающая турбулентная конвекция индуцировалась постоянным потоком тепла H_0, создаваемым поверхностным источником тепла в виде круглой пластины D (рис. 1a, b). Этот источник тепла моделирует прототип городского острова тепла с малым относительным удлинением ($z_i / D << 1$, z_i – высота перемешанного слоя, определяемая как высота, на которой достигается максимальная отрицательная разность между температурой в центре факела и окружающей температурой (рис. 1a)) в условиях слабого ветра и устойчивой стратификации окружающей среды.



a b

Рис. 1. (a) – схема циркуляции острова тепла (z_i – высота перемешивания, ρ_0 – плотность стандартной атмосферы, ρ_m – плотность в центре теплового факела), (b) – теневая фотография острова тепла, полученная в лабораторном эксперименте [3]. Момент времени $t = 240$ с. соответствует квазиустановившейся циркуляции

Уравнения термогидродинамики, описывающие циркуляцию над городским островом малого относительного удлинения могут быть записаны в гидростатическом приближении без учета силы Кориолиса и радиации в осесимметричной цилиндрической системе координат (здесь не приводятся). Эффекты плавучести учитываются в приближении свободной конвекции (приближении Буссинеска)

Наиболее простые, явные параметризации турбулентных потоков импульса и тепла имеют вид [2]:

$$-\langle w\theta\rangle = c_T \frac{E^2}{\varepsilon} Fr^{-2}\sqrt{2R}\frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1-c_{2\theta}}{c_{1\theta}}\frac{E}{\varepsilon}\sqrt{2R}\cdot Fr^{-2}\langle\theta^2\rangle, \qquad (1)$$

$$-\langle v\theta\rangle = c_T \frac{E^2}{\varepsilon}\sqrt{2R}\frac{\partial T}{\partial r}. \qquad (2)$$

Для нормальных турбулентных напряжений используется модель градиентной диффузии Буссинеска, сохраняющая некоторую анизотропию нормальных напряжений

$$\langle v^2\rangle = \frac{2}{3}E - 2\nu_T\frac{\partial V}{\partial r}, \quad \langle w^2\rangle = \frac{2}{3}E - 2\nu_T\frac{\partial W}{\partial z}, \quad \langle u^2\rangle = \frac{2}{3}E - 2\nu_T\frac{V}{r} \qquad (3)$$

Турбулентная вязкость в (3) определяется из соображений размерности, следуя невязкой оценке диссипации кинетической энергии турбулентности [4, 5]:

$$\nu_T = c_\mu \cdot E^2/\varepsilon \qquad (4)$$

Откалиброванные коэффициенты в (1) – (4) имеют численные значения [1, 6, 7]: $c_\mu = 0,09$, $c_{1\theta} = 3,28$, $c_{2\theta} = 0,5$, $R = 0,6$, $c_T = 0,095$.

Параметры E, ε и $\overline{\theta^2}$ в (1) – (4) находятся из решения замкнутых уравнений переноса (здесь не приводятся, см. [8]).

Приводимые ниже численные результаты получены для значений параметров экспериментальной реализации проникающей термической конвекции в [3].

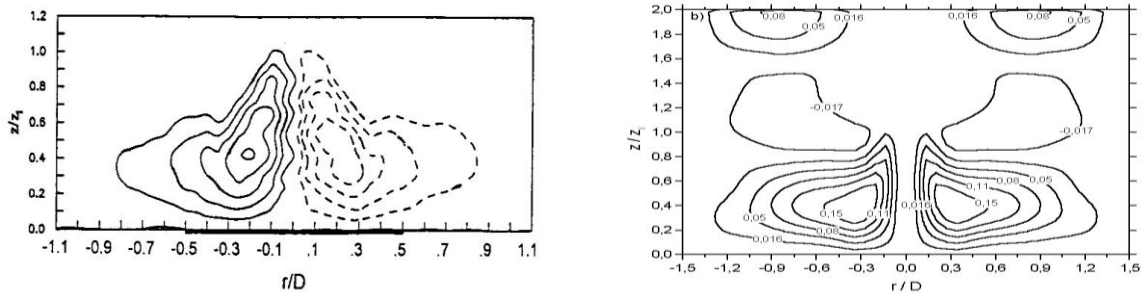


Рис. 2 Линии тока циркуляции воздуха над островом тепла:
слева – экспериментальные линии тока, справа – результат вычисления

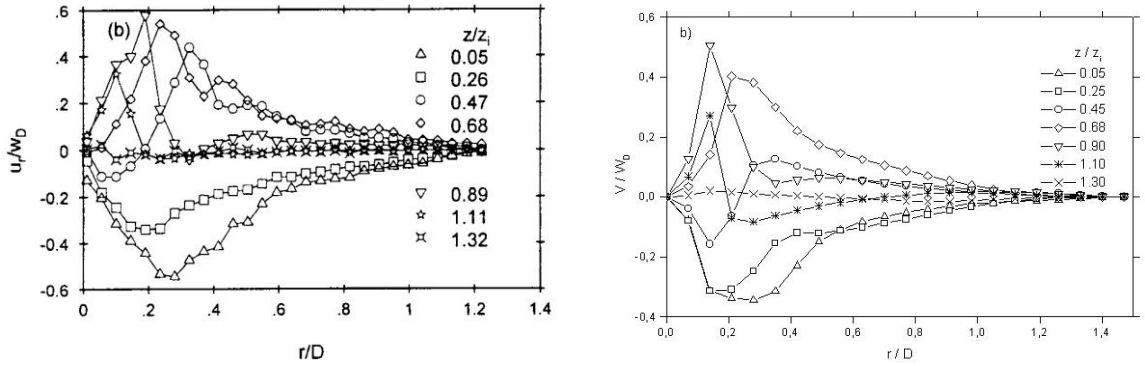


Рис. 3. Профили радиальной (горизонтальной) средней скорости V
на различных высотах над островом тепла: слева – эксперимент [3],
справа – вычисление при тех же параметрах (как на рис. 2)

Вблизи поверхности величина скорости потока, натекающего с периферии острова тепла, возрастает в направлении к центру, достигая максимума при, примерно, при r/D ≃ 0,25, затем убывает до нуля в центре острова тепла. Скорость оттекающего потока наверху также возрастает с удалением от центра, достигая максимума, примерно, при r/D ≃ 0,25 (рис. 1а). В отличие от экспериментальных данных [3], вычисленный вертикальный профиль горизонтальной скорости имеет реалистичное поведение вблизи поверхности с обращением скорости в нуль на поверхности (здесь не показано). В эксперименте вязкий подслой не разрешался в силу ограничения лабораторного моделирования острова тепла: $z_i / D << 1$.

Скорость трения (рис. 4) изменяется по радиальной координате в согласии с изменением горизонтальной скорости (рис. 3).

Измеренные вертикальные профили температуры (рис. 5а) и вычисленные профили температуры (рис. 5b) указывают на хорошее перемешивание в

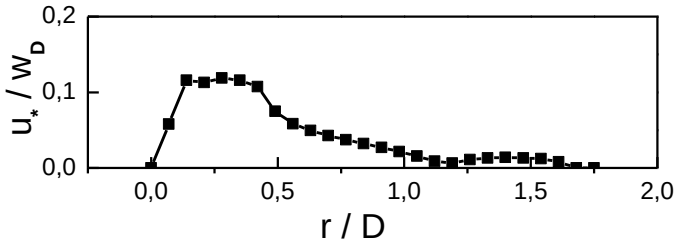


Рис. 4. Нормализованная скорость трения u_*/W_D.

нижней и центральной части факела. Такой характер поведения температурных профилей с высотой относится реальным ночным пограничным слоям, в которых преобладают неустойчивые (конвективные) условия, вследствие восходящего потока тепла от урбанизированной поверхности при слабом окружающем ветре. На обоих рис. 5(a, b) видно, что профили температуры внутри факела имеют характерное "вздутие": температура внутри факела оказывается ниже температуры вне его на той же высоте, фиксируя тем самым область отрицательной плавучести, вследствие возвышения факела в центре. Эта высота возвышения максимальна на оси факела и уменьшается с расстоянием от его центра. Тепловой факел имеет куполообразную верхнюю часть в виде "шляпы" (см. теневую фотографию на рис. 1b).

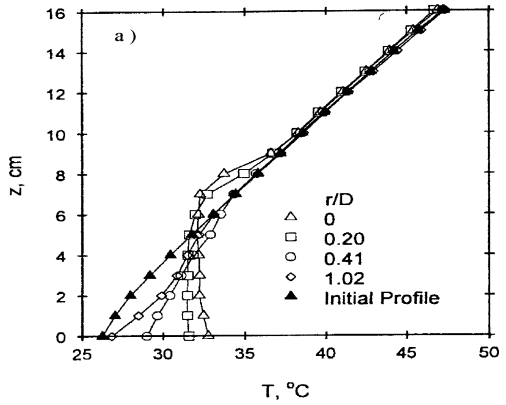


Рис. 5a. Измеренные профили температуры над островом тепла

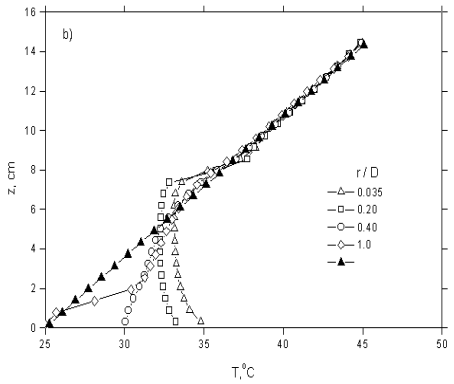


Рис. 5b. Вычисленные профили температуры над островом тепла

Структура турбулентного теплового факела представлена на рис. 6b распределениями среднеквадратичных флуктуаций горизонтальной и вертикальной турбулентных скоростей по высоте в центре факела. Как данные измерений [3], так и результаты вычислений показывают, что большие значения σ_v / W_D и σ_w / W_D внутри перемешанного слоя быстро убывают с высотой выше слоя вовлечения (для $z > z_i$). Измеренный профиль σ_v / W_D располагается при меньших значениях, чем вычисленный профиль. Как указано в [3], конечные размеры экспериментальной установки все же оказывали влияние циркуляцию, подавляя горизонтальное движение и таким образом понижая уровень значений σ_v / W_D. Можно отметить, что простые параметризации турбулентных потоков (1) – (4) не только правильно воспроизводят характерные особенности распределений σ_v / W_D и σ_w / W_D, но и удовлетворительно отражают их анизотропный характер.

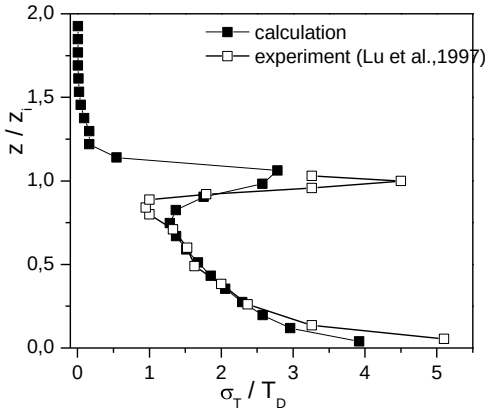


Рис. 6a. Вертикальный профиль дисперсии турбулентных флуктуаций температуры от высоты в центре теплового факела: □ – измерения [3], ■ – численное решение. Профиль σ_T / T_D убывает от максимального значения на подстилающей поверхности до минимального значения на высоте $z / z_i = 0.85$

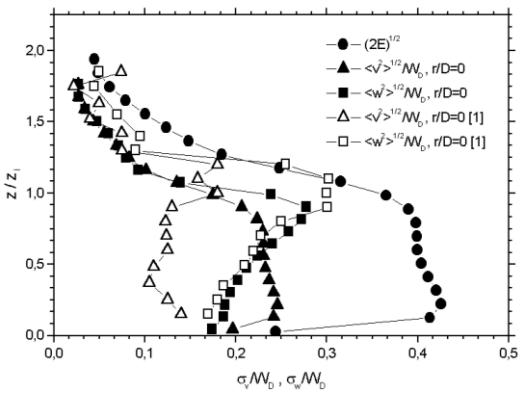


Рис. 6b. Нормализованные распределения среднеквадратичных флуктуаций турбулентной скорости в центре факела по данным измерений [4] ($Fr = 0.077$; $Re = 8280$): △ – профиль горизонтальной дисперсии скорости, □ – профиль вертикальной дисперсии скорости. Вычисления: ▲ – горизонтальная дисперсия скорости, ■ – вертикальная дисперсия скорости; ● – вычисленная интенсивность турбулентности, $q^2 = < u_i^2 >$

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-05-00006а) и программы фундаментальных исследований Президиума РАН №1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sommer T. P., & R. M. C. So. On the modeling of homogeneous turbulence in a stably stratified flow // Phys. Fluids.−1995. − Vol.7. − P. 2766-2777.

2. Kurbatskii A. F.: Computational modeling of the turbulent penetrative convection above the urban heat island in stably stratified environment // Journal of Applied Meteorology−2001 − Vol. 40. − P.1748-1761

3. Lu J., Araya S.P., Snyder W.H., Jr. Lawson R.E.: A Laboratory Study of the Urban Heat Island in a Calm and Stably Stratified Environment. Part I: Temperature Field; Part II: Velocity Field // Journal of Applied Meteorology.−1997. − Vol.36. − P.1377-1402.

4. Tennekes H, Lumley J. L. 1972. A first course in turbulence. Cambridge, MA: MIT Press.

5. Курбацкий А. Ф. Лекции по турбулентности. Часть I. НГУ, 2000.

6. Jin L. H., So R. M. C., Gatski T. B. Equilibrium states of turbulent homogeneous buoyant flows // J. Fluid Mech.−2003. − V.482. – P. 207-233.

7. Курбацкий А. Ф. Лекции по турбулентности. Часть II. НГУ, 2001.

8. Курбацкий А. Ф., Курбацкая Л. И. Трехпараметрическая модель турбулентности для атмосферного пограничного слоя над урбанизированной поверхностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.−2006. − 46(2). − С. 476-494.

© Л. И. Курбацкая, А. Ф. Курбацкий, 2015

УДК 551.583+519.6

РАСЧЕТЫ СТОКА РЕК СИБИРИ В XXI ВЕКЕ

Виктор Иванович Кузин
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)330-64-50, e-mail: kuzin@sscc.ru

Наталья Александровна Лаптева
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

В статье обсуждаются результаты расчетов по линейной резервуарной модели климатический речной сток для Сибирского региона. При верификации модели применялись данные реанализов ERA40 и MERRA для расчета стоков в XX веке. Расчеты для XXI века проводились на данных расчетов по моделям INM, CNRM и GFDL по сценарию RCP 8.5 проекта CMIP5 IPCC.

Ключевые слова: математическое моделирование, климатический речной сток, бассейны рек Обь, Енисей и Лена.

CALCULATION OF THE SIBERIAN RIVERS RUNOFF IN THE XXI CENTURY

Victor I. Kuzin
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, doctor, Head of the Laboratory, tel. (383)330-64-50, e-mail: kuzin@sscc.ru

Natalya A. Lapteva
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, junior Researcher, tel. (383)330-64-50, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

The article discusses the results of calculations by the linear reservoir model climatic river runoff for the Siberian region. For the verification of the model the ERA40 and MERRA reanalysis data for the XX century were used. For the XXI century calculations by the data of the INM, CRNM, GFDL models of the scenario RCP 8.5 of the Project CMIP5 IPCC were done.

Key words: mathematical modeling, climatic river runoff, Ob, Yenisei and Lena rivers basins.

Введение.

В последние десятилетия неоспоримым фактом стали климатические изменения, происходящие в Арктическом регионе. Важным следствием этих изменений является то, что эти процессы могут привести к откликам в глобальной климатической системе на основе механизмов обратных связей. В существенной степени это относится к гидрологической составляющей климата Арктики и ее важной составляющей Северного Ледовитого океана, содержащего по оцен-

кам [1] в среднем около 84 тыс. куб. км пресной воды. В качестве примера наличия обратной связи в системе Арктики можно привести возникновение в Северном Ледовитом океане в 60-х, 70-х годах прошлого столетия аномалии солености [2], возникшей вследствие колебаний в арктической климатической системе. Распространяясь в северные моря Атлантики, аномалия оказала влияние на интенсивность глубокой конвекции, формирующей глобальный "конвеерный пояс" [3, 4], что привело к изменению режима меридиональной термохалинной циркуляции Мирового океана [5]. Именно поэтому интерес к гидрологическим процессам в Сибири и Арктике в последние десятилетия существенно возрос.

Существенным источником притока пресной воды в Северный Ледовитый океан является речной сток. Оценки, приведенные в работах [1,5] дают значения в среднем 3.2 - 3.3 тыс. куб. км в год, что составляет около 54 % всего притока пресной воды, поступающей в бассейн. Из этого объема крупные реки Сибири дают порядка 1.9 тыс. куб. км в год, что составляет 59% от всего речного стока. Наибольшую величину стока дают такие реки как Обь, Енисей и Лена. Эти реки привносят 46% притока всей речной воды в Северный Ледовитый океан [6,7]. Основываясь на данных, приведенных в R-ArcticNET [http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html] суммарный сток для трех рек оценивается величиной 1.5 тыс. куб км в год. Остальные реки дают средние значение стока около 381.7 куб. км в год.

Однако, как видно из приведенных оценок и основываясь на данных Гидрометслужбы [8, 9] и данных R-ArcticNET суммарный годовой расход сибирских рек за период второй половины XX века претерпевает существенные межгодовые вариации. Изменения для отдельных рек составляют от 25 до 40%. Существенную роль при этом, как можно предполагать, играет межгодовая климатическая изменчивость атмосферной циркуляции и характеристики поверхности. Для Западной Сибири это связано с особенностями климатических условий: наличием обширных болотных массивов, типами растительности, вследствие чего наблюдается обратный баланс между осадками и эвапотранспирацией [1]. Результирующий речной сток составляют около 24% от всего количества воды, поступающей в бассейн. В отличие от этого, водные запасы рек Восточной Сибири вследствие наличия многолетней мерзлоты пополняются в основном дождевыми и талыми снеговыми водами, которые составляют 44% - 60% от всего поступающего количества воды. Этот факт был учтен при формировании влагозапаса в почве и грунтового стока.

Наряду с межгодовой изменчивостью в гидрологических характеристиках сибирских рек наблюдаются устойчивые положительные тренды [10].

Все эти факты свидетельствуют о том, что влияние изменчивости гидрологических характеристик в Сибирской части Арктики на баланс пресной воды в Северном Ледовитом океане (см., например, [11]) требует дополнительных исследований на основе климатических моделей с расчетом речного стока [12].

Наряду с анализом изменений гидрологической составляющей климатической системы Сибири в XX веке, полученных на основе данных реанализов ERA40 и MERRA, проведенных в работах [13, 14], представляет интерес рас-

смотреть проекцию развития гидрологических характеристик Сибири и, в частности, речного стока в XXI веке.

Настоящая статья посвящена рассмотрению отдельных аспектов проблемы климатических изменений гидрологии Сибири в XXI веке на основе данных расчетов по моделям проекта CMIP5. В ней представлены результаты расчетов, проведенных по климатической модели речного стока ИВМиМГ СО РАН на основе данных результатов моделей INM (Россия), CNRM (Франция) и GFDL (США) для XXI века по сценарию RCP-8.5.

Используемая для расчетов модель речного стока является линейной, резервуарной моделью типа Калинина-Милюкова [15, 16]. Поверхностный, грунтовый и речной сток определяется на основе последовательного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, сведенных к интегралам свертки (Дюамеля). Конкретная реализация модели представлена в работах [13, 14, 17]. В модели производится учет процентного содержания болот и озер.

Результаты моделирования.

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение составляющее 1/3 градуса по широте и долготе соответственно. Модель речного стока покрывает Сибирский регион по долготе от 50° до 170° в.д. и по широте от 40° до 80° с.ш.. В модели учитывались бассейны рек: Обь - Иртыш, Енисей - Ангара, Лена, Пур, Таз, Хатанга, Анабар, Оленек, Яна, Индигирка, Колыма.

Для указанных бассейнов были сделаны численные расчеты по моделированию стока рек для периода 2006 - 2100 гг. на основе данных атмосферных характеристик по результатам расчетов моделей: INM (ИВМ РАН), CNRM (Meteo-France), GFDL (Princeton, USA), участвующим в проекте CMIP5 сценария RCP-8.5, представленных в базах данных IPCC (cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5). Предварительно был проведен анализ данных по изменению климатических и гидрологических характеристик бассейнов рек Западной и Восточной Сибири в XXI веке. Результаты расчетов речного стока, проведенных по этим данным показывают устойчивые положительные тренды для всех сибирских рек. На рис. 1 представлены графики суммарного годового стока в Северный Ледовитый океан, осредненные по десяти годам, рассчитанные по входным данным трех моделей. Графики показывают наибольшее увеличение стока для данных по модели GFDL. Наименьшее увеличение стока дает модель INM. Результата расчетов по данным CNRM дает более низкие значения, чем по данным GFDL, с близким по наклону трендом. На рис. 2 представлены среднеклиматические годовые гидрографы суммарного притока пресной воды в Северный Ледовитый океан от сибирских рек. Результаты расчетов сравнивались с климатическими данными наблюдений для XX века. И графиков видно, что увеличение речного стока происходит за счет более раннего наступления половодья, а также вследствие увеличения осадков в летний и осенний сезоны. При этом амплитуда и фаза пика половодья практически не меняется. На рис. 3 представлена межгодовая изменчивость стоков за указанный период. Наибольшая дисперсия стока наблюдается в результатах по модели GFDL, наименьшая - в INM. Взаимная

корреляция между межгодовыми расходами для INM, CNRM и GFDL составляет величину порядка 0.65.

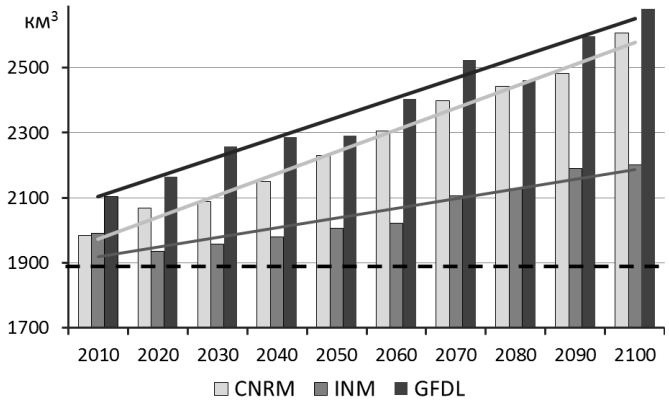


Рис. 1. Суммарный годовой сток в СЛО, осредненный по 10 годам

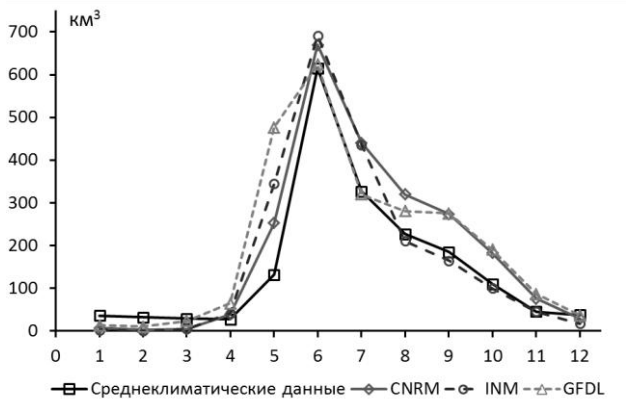


Рис. 2. Среднеклиматические гидрографы притока пресной воды в СЛО

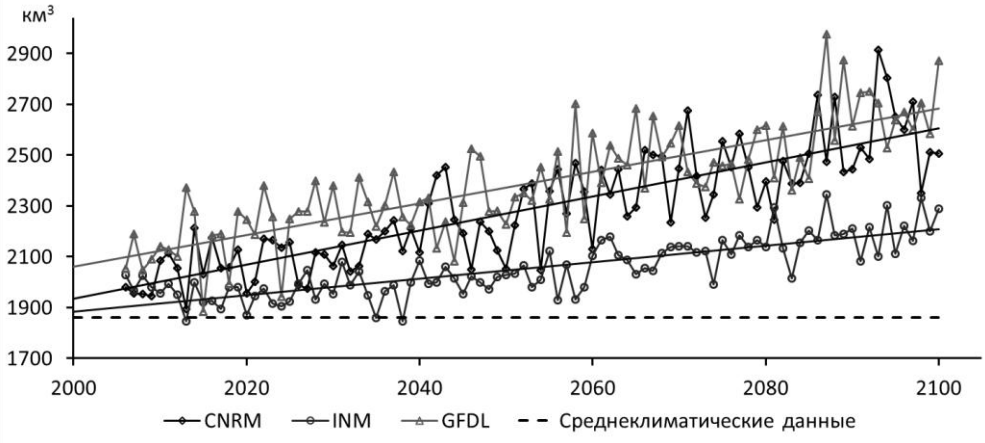


Рис. 3. Межгодовая изменчивость общего стока сибирских рек в СЛО в XXI веке. Сплошной линией представлен линейный тренд стока, пунктирной линией - климатическое значение

Заключение.

В статье представлены результаты по расчету стока Сибирских рек в Северный Ледовитый океан в XXI веке. Предварительная верификация модели, проведенная для второй половины XX века на основе данных реанализов ERA40, MERRA и данных измерений, свидетельствовала о достаточной адекватности модели в описании гидрологических процессов Сибирского региона. Следующим этапом было проведение расчетов на основе проекции климатических изменений по сценарию RCP 8.5 проекта CMIP5 IPCC. В качестве входных данных были выбраны результаты расчетов по моделям INM, CNRM и GFDL. Результаты расчетов показывают устойчивый положительный тренд для всех трех моделей. Наибольший рост притока дает модель GFDL, наименьший - INM. Сток по модели CNRM имеет средние значения при совпадении наклона тренда с трендом GFDL.

Работа выполнена при поддержке программы ОМН РАН 1.3.3-6., Президиума РАН 23.3-1. и гранта РФФИ 14-05-00730.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // Journal of Geophysical Research. - 2006. - V. 111: C11010. - doi:10.1029/2005JC003424. - P. 1-19.

2. Dickson R.R., Meincke J., Malmberg S.-A., Lee A.J. The "Great Salinity Anomaly" in the Northern North Atlantic 1968-1982 // Progr. in Oceanogr. - 1988. - V. 20. - P. 103-151.

3. Лаппо С.С. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы. - М.: Московское отделение Гидрометеоиздата. - 1984. С. 125-129.

4. Broecker W.S. The great ocean conveyor // Oceanography. - 1991. -V.4. - № 2. - P. 79-89.

5. Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the arctic circulation // J. Geophys. Res. - 1989. - V. 94. - Issue C10. - P. 14485-14498.

6. Berezovskaya S., Yang D, Kane D.L. Compatibility analysis of precipitation and runoff trends over the large Siberian watersheds // Geophysical Research Letters. - 2004. - V. 31. - L21502. doi:10.1029/2004GL121277. - P. 1-4.

7. Shiklomanov I. A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Peterson B.J., Vorosmarty C.J. The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean // in The Freshwater Budget of the Arctic Ocean, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Tallin, Estonia. - 2000. - P. 281 – 296.

8. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши - Л: Гидрометеоиздат. - 1985. - Т. 1. - Вып.10. Бассейн Оби. - 616 с. - Вып.12. Бассейн Енисея. - 413 с. - Вып.16. Бассейн Лены. - 455 с.

9. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1981-1990 - часть 1. - Т. 1. - Новосибирск, вып.10. - Красноярск, вып.12. - Якутск, вып.16.

10. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vorosmarty C.J., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // Science. - 2002. - V. 298. - P. 2171–2173.

11. Кузин В.И., Платов Г.А., Голубева Е.Н. Влияние межгодовой изменчивости стока сибирских рек на перераспределение потоков пресной воды в Северном Ледовитом океане и в Северной Атлантике // Известия РАН. ФАО. - 2010. - Т. 46. - № 6. - С. 831–845.

12. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2001: The Scientific Basis; Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC // Edited by Houghton J.C. et al. Cambridge Univ. Press. New York. - 2001. - 881 p.

13. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // Оптика атмосферы и океана. - 2012. - Т. 25. - № 06. - С. 539–543.

14. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование стока основных рек Сибири // Оптика атмосферы и океана. - Т. 27. - № 06. -2014. - С. 525–529.

15. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. - Л.: Гидрометеоиздат, 1972. - 190 с.

16. Бураков Д.А. К оценке параметров линейных моделей стока // Метеорология и гидрология. - 1989. - № 10. - С. 89-95.

17. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model // Technical report No 17, MPI, Hamburg. - 1998. - 42 p.

© В. И. Кузин, Н. А. Лаптева, 2015

УДК 551.482.215.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОРАЗВЕТВЛЕННОЙ ДЕЛЬТЫ Р. ЛЕНА К ЗАДАНИЮ КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ НА МОРСКИХ ГРАНИЦАХ

Вячеслав Александрович Шлычков
Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Морской, 2, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

Алла Ивановна Крылова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: alla@climate.sscc.ru

При разработке гидродинамической модели русла в устьевой области реки необходимо сформулировать краевую задачу для уравнений Сен-Венана, описывающих динамику воды в протоках. В качестве условия сопряжения на выходных границах принимается совпадение расчетных уровней свободной поверхности в рукавах с уровнем моря. Возникает задача изучения чувствительности модели речной дельты и оценки погрешности к вариациям граничных значений уровня моря.

Ключевые слова: гидродинамическая модель, чувствительность модели, возмущение краевых условий, уровень свободной поверхности.

SENSITIVITY OF A NUMERICAL MODEL OF THE LENA RIVER DELTA TO BOUNDARY CONDITIONS ON SEA WATER BOUNDARIES

Vyacheslav A. Shlychkov
Novosibirsk Division of Institute for Walter and Environmental Problems of Sibtrian Branch of the RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Morskoy ave., Dr. Sci., Chief Researcher

Alla I. Krylova
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentieva, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: alla@climate.sscc.ru

A hydrodynamic model for the Lena River delta is described. The model is based on a boundary-value problem for the Saint-Venant equations for the delta channels. A condition of matching the free surface levels to a constant sea level is imposed on the outflow boundaries. The sensitivity of the model to sea level variations is estimated.

Key words: hydrodynamic model, sensitivity of the model, variations of boundary conditions. free surface level.

1. Численная модель сложноразветвленного устья р. Лена. Гидродинамическая модель дельты описывает водный режим реки от с. Кюсюр в нижнем течении р. Лены до впадения речных вод в морскую акваторию.

Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) дельты, необходимой для учета в уравнениях движения, включало несколько этапов: 1) геометрическая

схематизация русловой сети с выделением основных проток, имеющих выраженную гидравлическую и пространственную обособленность, и второстепенных; 2) векторизация береговых линий крупных и широких проток и трассировка небольших водотоков.

Итоговая картина системы рукавов дельты с плановой конфигурацией водного зеркала представлена на рис. 1.

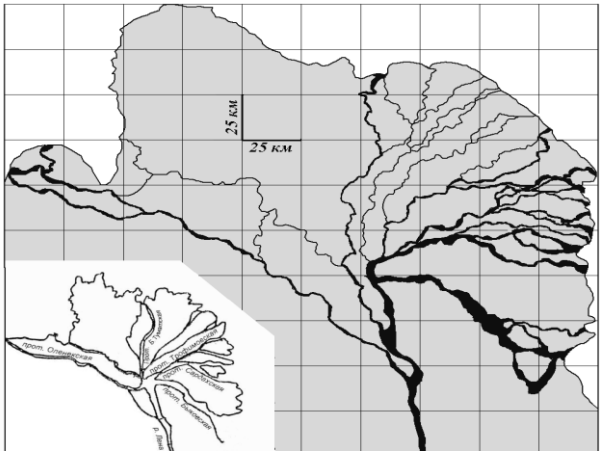


Рис. 1. Структура водотоков дельты р. Лены, учтенных в ЦМР:
на врезке – схема расположения основных проток дельты

При построении топологической схемы дельты каждый рукав с присущими ему индивидуальными гидрологическими характеристиками ассоциировался с направленным отрезком на плоскости, а совокупность таких отрезков образовывала связный граф. Полученная геометрическая модель дельты содержит систему связанных между собой 82 русловых участков и 70 узлов сочленения. Рис. 2 иллюстрирует итоговую структуру графа.

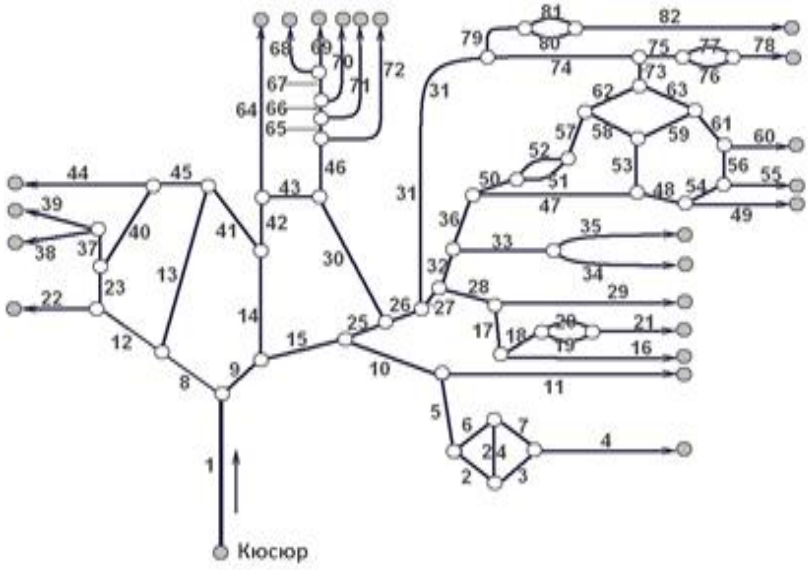


Рис. 2. Схематизация русловой сети дельты р. Лены в виде графа:
Сплошные линии – речные участки, кружки – узлы деления потока и внешние границы.
Цифры у ребер отражают нумерацию участков русла

Описание расходно-уровенного режима системы русел проводится на основе гидродинамической модели с использованием уравнений Сен-Венана в одномерном приближении [1]. Численное решение уравнений получено методом контрольного объема на основе применения неявной схемы с сохранением интеграла Бернулли [2]. Трудность решения задачи с помощью неявного метода заключается в том, что на каждом участке граничные значения заранее неизвестны и должны быть определены специальными методами [3].

2. Морфометрическая и гидрологическая информация. Для привязки модели дельты к морфологическим характеристикам местности требуется задание донного рельефа для каждого участка и определение функциональной связи

$$\omega_k = \omega_k(s_k, \zeta_k), \qquad (1)$$

которая позволяет рассчитать площадь живого сечения в зависимости от распределения уровня внутри руслового участка.

Исходя из морфологических особенностей разных проток дельты зависимость (1) отыскивалась в виде полинома

$$\omega_k = A_k h_k + B_k h_k^2,$$

где h_k - среднестатистическая глубина, A_k, B_k - коэффициенты, подбор которых осуществлялся опытным путем для каждого из русловых кластеров.

Табл. показывает среднее измеренное по [4] и расчетное распределение расхода воды основных проток дельты р. Лены (в процентах от расхода в вершине дельты, который в тестовом расчете был задан величиной 20000 м^3/с).

Таблица

Процентное распределение расходов по протокам дельты р. Лена

Протоки	Измеренный расход	Расчетный расход
Быковская протока	24	23,3
Трофимовская и Сардахская протоки	64	64,8 в том числе 31,5% по Трофимовской и 33,3% по Сардахской
Оленекская протока	5	6,1
Б. Туматская протока	4	5,8

Анализ таблицы показывает, что погрешность расчета не превышает 2%, что сопоставимо с погрешностью измерений. Таким образом, можно утверждать, что численная модель удовлетворительно описывает гидравлический режим дельты и может быть использована как инструмент воспроизведения потоков массы и тепла в дельте р. Лены.

3. Исследование чувствительности модели дельты к вариациям параметров. При формулировании краевой задачи для уравнений Сен-Венана на входной границе в вершине дельты задается полный расход воды в русле, а вы-

ходными границами служат множественные линии раздела морских и речных вод, где ставятся условия сопряжения течений. В качестве этих условий принимается совпадение расчетных уровней свободной поверхности в рукавах с уровнем моря. Значение уровня морской поверхности при раздельном расчете течения в дельте удобно принять константой, равной нулю.

В действительности, уровень моря может значительно меняться в пространстве и со временем за счет приливных и нагонных явлений. Следовательно, упрощение, связанное с неизменностью уровня на выходных границах водотоков, вносит определенную погрешность в модельную динамику дельтовых вод, в частности, приводит к ошибкам при расчете перераспределения главного расхода по рукавам дельты.

Возникает задача оценки погрешности, генерируемой краевыми режимами на терминальных створах дельты и изучении чувствительности модели дельты к вариациям граничных значений уровня на морских границах.

Исследование проводилось на основе прямого расчета параметров течения в рукавах дельты при заданных локальных вариациях уровня морской поверхности, как фактора возмущения краевых условий. Прямой метод достаточно прост в реализации и дает ясное представление о степени влияния краевых условий на внутреннюю структуру водотоков.

В соответствии с таблицей 1 в качестве основных рассматриваются 5 проток дельты: Быковская, Трофимовская, Сардахская, Оленекская и Б.Туматская. Из рис. 2 определяется совокупность периферийных участков, относящихся к выделенным протокам. В качестве независимых параметров, подлежащих вариациям в задаче исследования чувствительности, принимаются группы узлов, позиционированных на морских границах и отвечающих основным протокам дельты. Тем самым проведена редукция задачи с большим числом параметров к задаче с набором из 5 параметров, соответствующих количеству основных проток дельты.

Варьируя один из параметров и оставляя неизменными остальные, можно проанализировать изменение расходов по протокам, обусловленное изменением уровня моря в устье выделенной протоки. С учетом наблюдаемых колебаний уровня моря в районе дельты для $\zeta_0^{(k)}$ принимается диапазон изменения от -2 м до 3 м.

Рис. 3 дает представление о количественных характеристиках чувствительности модели дельты к краевым условиям на морских границах.

4. Результаты моделирования. Численные эксперименты показали, что сгонные понижения уровня слабо сказываются на изменении внутренней структуры расходов в дельте, а нагонные повышения морской поверхности могут привести к заметной перестройке потоков массы. Исходя из этого, можно предположить, что при описании процессов в дельте в интервале умеренных значений вариаций уровня допустимо пренебречь погрешностью, вызванной динамикой уровенной поверхности моря.

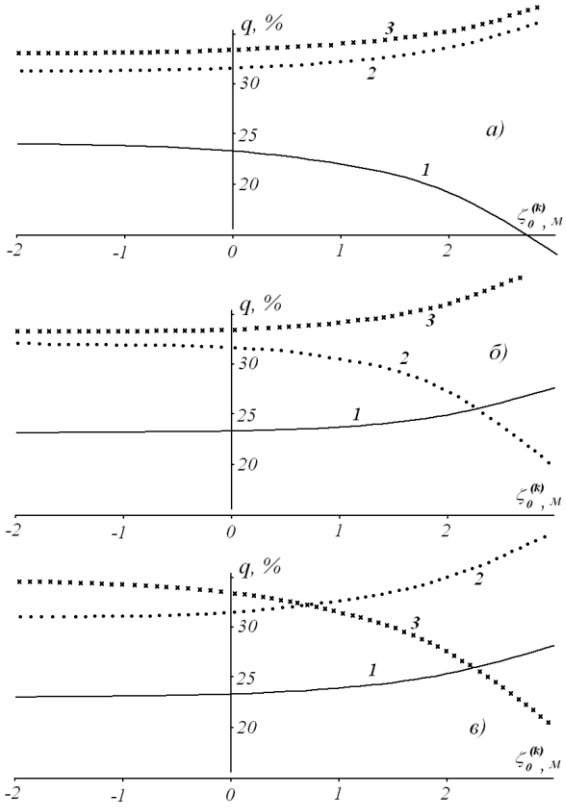


Рис. 3. Изменение расхода воды (в процентах от главного расхода) при вариациях уровня в устье а) Быковской; б) Трофимовской; в) Сардахской проток:
кривые 1, 2, 3 показывают изменение расходов в Быковской, Трофимовской и Сардахской протоках соответственно

БИБЛИОГРАФИЧЕСКУИЙ СПИСОК

1. V.A.Shlychkov , G.A.Platov, A.I.Krylova A coupled hydrodynamic system of the Lena River delta and the Laptev Sea shelf zone: the model tuning and preliminary results of numerical simulation // Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., - 2014. - V.14. – P. 81-103.

2. Шлычков В.А. Численная модель для уравнений мелкой воды на криволинейной сетке с сохранением интеграла Бернулли. Журнал вычислительной математики и математической физики. 2012. Т.52. № 4. С.1-8.

3. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.Ф., Овчарова А.С. Численные методы решения задачи о неустановившемся движении воды на устьевых участках рек. Труды ААНИИ. 1983. Т.378. С.23-34.

4. Гуков А.Ю. Гидробиология устьевой области реки Лены. – М. Научный мир, 2001. – 288 с.

© В. А. Шлычков, А. И. Крылова, 2015

УДК 550.34

ВЫДЕЛЕНИЕ МЕДЛЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ВРЕМЕН ВСТУПЛЕНИЙ ВОЛН ПРИ КОРРЕКЦИИ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВИБРОСЕЙСМОГРАММ

Валерий Викторович Ковалевский
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, заместитель директора, тел. (383)330-70-69, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Людмила Петровна Брагинская
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sscc.ru

Андрей Павлович Григорюк
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-70-69, e-mail: and@opg.sscc.ru

Цырен Алексеевич Тубанов
Геологический институт СО РАН, 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, тел. (3012)43-49-21, e-mail: siren65@mail.ru

Артем Дамбиевич Базаров
Геологический институт СО РАН, 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, научный сотрудник, тел. (3012)43-49-21, e-mail: gin@gin.bscnet.ru

В статье приведены результаты коррекции сезонных изменений сейсмограмм и анализа вариаций времен вступления волн при многолетнем вибросейсмическом мониторинге Байкальской рифтовой зоны с использованием виброисточника ЦВО-100. Выделен многолетний тренд в вариациях времен вступлений для трассы распространения вибратор-сейсмостанция Тырган, составляющий величину 0,6–0,7 мсек/год, связанный с медленным изменением скоростных характеристик земной коры под Байкалом.

Ключевые слова: вибросейсмический мониторинг, вариации времен прихода волн, коррекция сейсмограмм.

DETERMINATION WAVE ARRIVAL TIMES SLOW VARIATIONS USING CORRECTION OF SEASONAL CHANGES IN VIBROSEISMOGRAMS

Valery V. Kovalevsky
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Doctor of Science, Deputy Director, tel. (383)330-70-69, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Ludmila P. Braginskaya
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, leading programmer, tel. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sscc.ru

Andrew P. Grigoryuk
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Scientist, tel. (383)330-70-69, e-mail: and@opg.sscc.ru

Tsyren A. Tubanov
Geological Institute, Siberian Branch of the Academy of Sciences, 670047, Russia, Ulan-Ude, 6a Sakhyanovoy St., Ph. D., Head of laboratory, tel. (3012)43-49-21, e-mail: siren65@mail.ru

Artem D. Bazarov
Geological Institute, Siberian Branch of the Academy of Sciences, 670047, Russia, Ulan-Ude, 6a Sakhyanovoy St., Scientist, tel. (3012)43-49-21, e-mail: gin@gin.bscnet.ru

The paper presents results of correction of seasonal changes seismograms and analysis of variations in arrival times of the waves at the long-term vibroseismic monitoring the Baikal Rift Zone using vibrosource CVO 100, p. Babushkin. It is identify the weak trend in the long-term variations of the arrival times for the propagation path vibrator seismic station Tyrgan, amounts to 0.6 - 0.7 ms / year, associated with the slow change in the speed characteristics of the crust beneath Lake Baikal.

Key words: vibroseismic monitoring, waves arrival times variations, correction seismograms.

При проведении вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны с использованием виброисточника ЦВО-100 (п. Бабушкин) проявляются сезонные изменения вибрационных сейсмограмм, которые выражаются в существенных вариациях амплитуд и временных сдвигов цугов колебаний, соответствующих отдельным волнам на сейсмограмме [1-5].

Для коррекции сезонных изменений сейсмограмм предложен алгоритм, основанный на коррекции их спектров. При многолетнем вибросейсмическом мониторинге накапливается база данных, включающая сейсмограммы $S_{i,j}$ (t), полученные в различные годы и месяцы на определенной сейсмостанции (здесь i – месяц, j - год).

Выбирается некоторая базовая сейсмограмма S_0 (t), со спектром F_0 (ω), к которой приводятся все сейсмограммы путем коррекции спектров. В качестве базовой сейсмограммы может быть взята усредненная сейсмограмма какого-то одного месяца, либо же усредненная по году.

Для каждой сейсмограммы $S_{i,j}$ (t) определяется ее спектр $F_{i,j}$(ω). Для каждого месяца в году определяется его усредненная по годам сейсмограмма S_{0i}(t) и ее спектр F_{0i} (ω) (i – месяц). Для сейсмограмм $S_{i,j}$ (t), полученных в различные годы и месяцы производится коррекция спектра по следующей формуле

$$F_{i,j\ корр}(\omega) = F_{i,j}(\omega))/ F_{0\,i}(\omega) * F_0(\omega) \qquad (1)$$

Далее обратным преобразованием Фурье по спектру $F_{i,jкорр}$(ω) восстанавливается скорректированная сейсмограмма $S_{i,j\ корр}$ (t) для i – месяца, j – года.

Пример коррекции сезонных изменений сейсмограмм приведен на рис. 1, где показаны сейсмограммы для сейсмостанции Хурамша за 2004-2006 гг. Сейсмограммы за разные месяцы и годы до коррекции характеризуются значительным разбросом амплитуд и временных сдвигов в цуге колебаний, соответ-

ствующей определенной волне. После коррекции значительно уменьшается как разброс амплитуд, так и разброс временных сдвигов и сейсмограммы становятся почти идентичными в основном цуге колебаний волны. Различия остаются существенными во временных промежутках между отдельными волнами, как до коррекции, так и после.

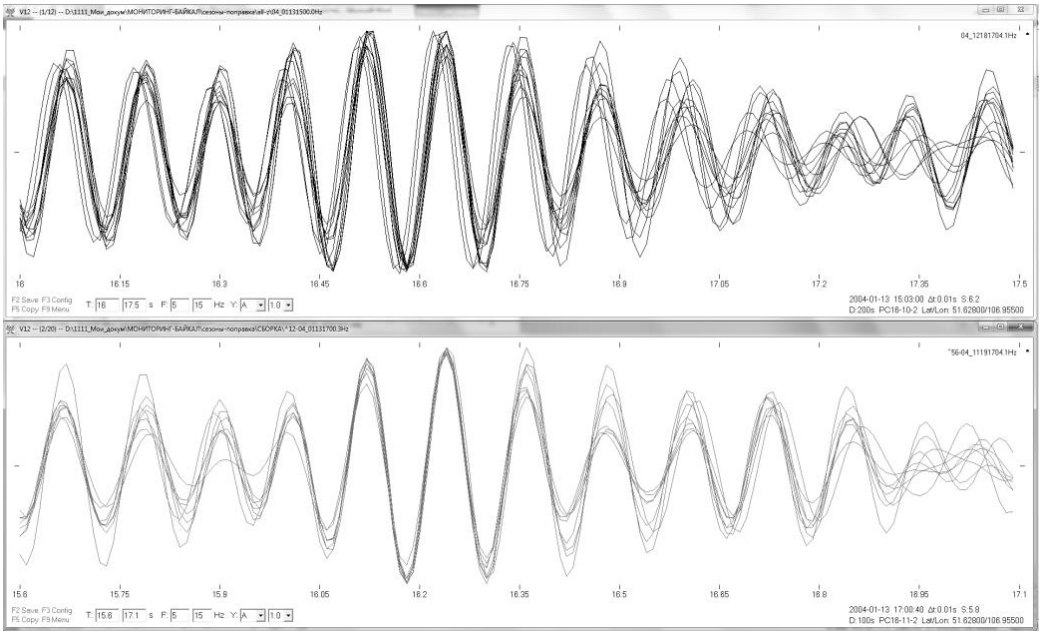


Рис. 1. Сейсмограммы 2004 -2006 гг. для сейсмостанции Хурамша до коррекции (вверху) и после коррекции (внизу)

Коррекция сейсмограмм позволяет убрать влияние сезонных изменений времен вступлений для отдельных волн и выделить долговременные тренды в вариациях времен вступлений, которые могут характеризовать изменчивость среды на трассах распространения волн.

Так для сейсмостанции Хурамша был выполнен анализ временных сдвигов (вариаций времени прихода) в цуге колебаний волны со временем прихода 16,5 сек до коррекции сезонных изменений сейсмограмм и после (рис. 2). До коррекции сейсмограмм временные сдвиги периодически изменяются от зимних месяцев к летним с максимальным значением до 25 мсек. После коррекции временные сдвиги отклоняются от среднего значения на величину 2,5-3 мсек. Это позволяет исследовать медленный тренд времен вступления волны за несколько лет. На рис. 2 внизу приведен линейный тренд для скорректированных времен вступлений за 2004-2006 гг. Его значение близко к нулю, что объясняется тем, что трасса распространения волн вибратор (п. Бабушкин) – сейсмостанция Хурамша пересекает хребет Хамар-Дабан, не имеющий тектонических движений на этой трассе.

Коррекция сезонных изменений сейсмограмм была выполнена также для сейсмостанции Тырган. Анализ временных сдвигов (вариаций времени прихода) в цуге колебаний волны со временем прихода 31,5 сек показал, что до кор-

рекции сейсмограмм временные сдвиги периодически меняются от зимних месяцев к летним с максимальным значением до 32 мсек, аналогично данным для сейсмостанции Хурамша. После коррекции временные сдвиги отклоняются от среднего значения на величину 2,5-3 мсек. Для сейсмостанции Тырган был выделен медленный тренд времен вступления волны за несколько лет. На рис. 3 внизу приведен линейный тренд для скорректированных времен вступлений за 2004-2006 гг. Его значение составляет величину 0,6 – 0,7 мсек/год. Трасса распространения волн вибратор (п. Бабушкин) – сейсмостанция Тырган проходит в земной коре под Байкалом и наличие малого тренда в вариациях времени распространения волны может свидетельствовать о слабых изменениях в скоростных характеристиках коры, возможно связанных с медленным изменением напряженного состояния от тектонических движений.

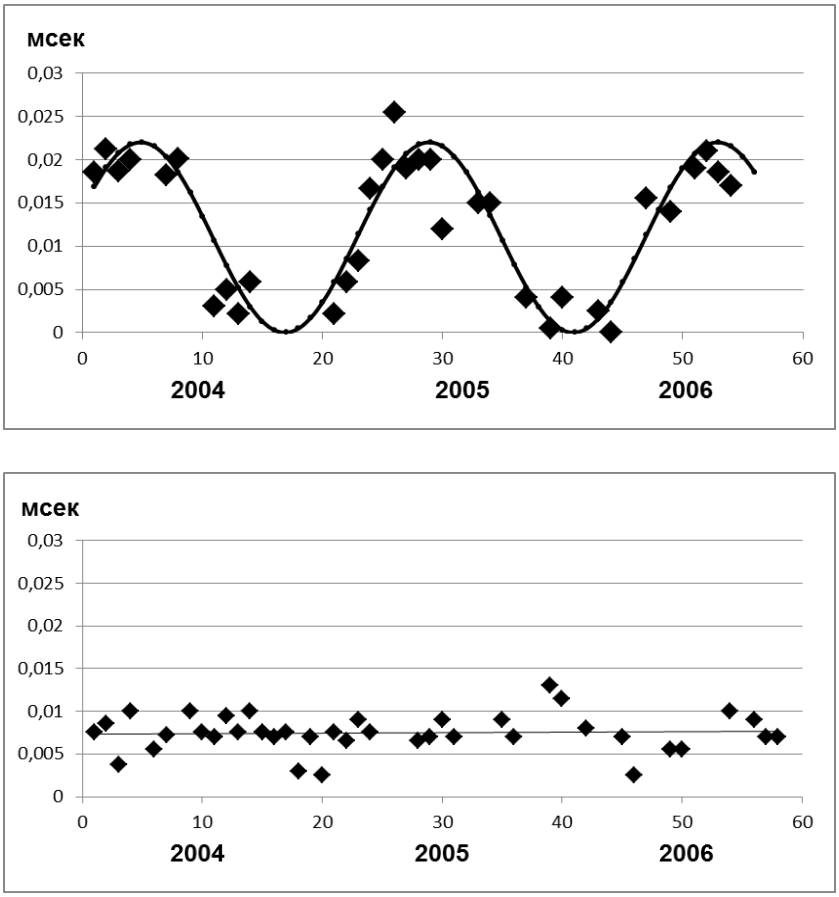


Рис. 2. Вариации временных сдвигов в цуге колебаний волны ($T_{вст}$=16,5 сек) определенные по сейсмограммам 2004 -2006 гг. до коррекции (вверху) и после коррекции (внизу). Сейсмостанция Хурамша, 68 км от вибратора

Важным следствием обнаруженных малых временных вариаций времени распространения волн на трассе пересекающей Байкальскую рифтовую зону является то, что определены количественные значения тренда изменения времени распространения за несколько лет. Его величина, составляющая менее 1 мсек в год, находится на пределе точности определения времен вступлений

волн на вибрационных сейсмограммах на расстояниях 200-400 км от вибратора. Это требует при проведении вибросейсмического мониторинга региона уделить основное внимание расположению сейсмостанций в местах с предельно низкими значениями микросейсмических шумов и отсутствием в них техногенной составляющей, а также прецизионной регистрации вибросейсмических сигналов при мониторинге.

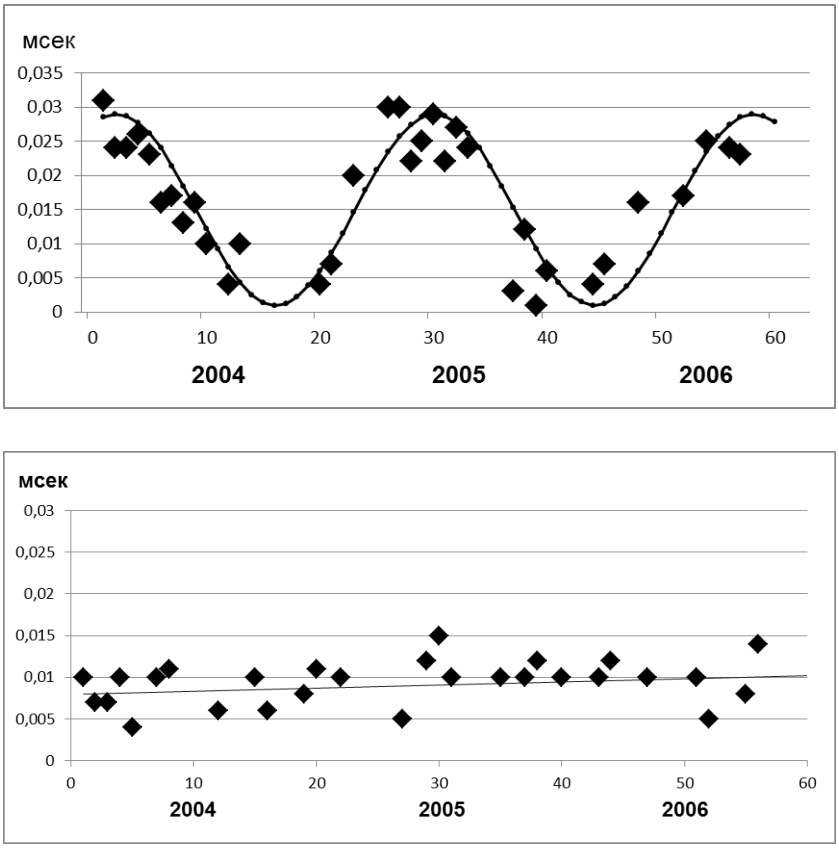


Рис. 3. Вариации временных сдвигов в цуге колебаний волны ($T_{вст}$=31,5 сек) определенные по сейсмограммам 2004 -2006 гг. до коррекции (вверху) и после коррекции (внизу). Сейсмостанция Тырган, 109 км от вибратора

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 15-07-06821-а, № 14-07-00832, ИП СО РАН 54.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д., Толочко В.В., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П. Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий //Отечественная геология. - 2013.- №3. - С. 16-23.

2. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Кашун В.Н., Татьков Г.И. Эксперименты по вибросейсмическому мониторингу земной коры // Проблемы региональной геофизики. – Новосибирск, 2001. – С. 55–57.

3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. и др. Исследование динамических особенностей сезонных изменений волновых полей при вибросейсмическом мониторинге среды // Геол. и геофиз., 1999, т. 40, № 3, С. 474-486.

4. Сезонные изменения вибросейсмического поля вибратора ЦВ-100 Южнобайкальского геодинамического полигона / Л. П. Брагинская, В. В. Ковалевский, Г. И. Татьков, А. П. Григорюк, Ц. А. Тубанов, А. Д. Базаров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 111–116.

5. Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д. Коррекция сезонных изменений вибрационных сейсмограмм при вибросейсмическом мониторинге Южнобайкальского региона // «Геофизические методы исследования земной коры» Матер. Всерос. конф. посв. 100-летию со дня рождения академика Н. Н. Пузырева. – Новосибирск, Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014, С. 219-222.

© В. В. Ковалевский, Л. П. Брагинская,
А. П. Григорюк, Ц. А. Тубанов, А. Д. Базаров, 2015

УДК 550.34

ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА 500-КМ ПРОФИЛЕ БАБУШКИН, БАЙКАЛ – УЛАН-БАТОР, МОНГОЛИЯ

Валерий Викторович Ковалевский
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, заместитель директора, тел. (383)330-71-96, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Цырен Алексеевич Тубанов
Геологический институт СО РАН, 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, тел. (3012)43-49-21, e-mail: siren65@mail.ru

Алексей Геннадьевич Фатьянов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел.(383)330-60-46, e-mail: fat@nmsf.sscc.ru

Людмила Петровна Брагинская
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sscc.ru

Андрей Павлович Григорюк
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-70-69, e-mail: and@opg.sscc.ru

Артем Дамбиевич Базаров
Геологический институт СО РАН, 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, научный сотрудник, тел. (3012)43-49-21, e-mail: gin@gin.bscnet.ru

В статье приведены результаты исследований характеристик волнового поля сейсмовибратора Южнобайкальского полигона на 500-км региональном профиле: Бабушкин – Сухэ-Батор – Дархан – Улан-Батор в южном направлении от источника. Проведено математическое моделирование волнового поля на профиле регистрации для сравнения с экспериментом и верификации существующей скоростной модели земной коры Прибайкалья и северной Монголии.

Ключевые слова: вибросейсмические исследования, сейсмический вибратор, волновые поля, профиль Бабушкин – Улан-Батор.

VIBROSEISMIC RESEARCH ON 500 KM PROFILE BABUSHKIN, BAYKAL – ULAN BATOR, MONGOLIA

Valery V. Kovalevsky
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Doctor of Science, Deputy Director, tel. (383)330-70-69, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Tsyren A. Tubanov
Geological Institute, Siberian Branch of the Academy of Sciences, 670047, Russia, Ulan-Ude, 6a Sakhyanovoy St., Ph. D., Head of laboratory, tel. (3012)43-49-21, e-mail: siren65@mail.ru

Aleksey G. Fatyanov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Doctor of Science, Head of laboratory, tel. (383)330-60-46, e-mail: fat@nmsf.sscc.ru

Ludmila P. Braginskaya
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, leading programmer tel. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sscc.ru

Andrey P. Grigoryuk
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, scientist, tel. (383)330-70-69, e-mail: and@opg.sscc.ru

Artem D. Bazarov
Geological Institute, Siberian Branch of the Academy of Sciences, 670047, Russia, Ulan-Ude, 6a Sakhyanovoy St., scientist, tel. (3012)43-49-21, e-mail: gin@gin.bscnet.ru

The pater presents the results of the studies wave field characteristics of the seismic vibrator in South-Baikal test site on the 500-km regional profile: Babushkin – Sukhbaatar – Darkhan - Ulaanbaatar in a southern direction from the source. Mathematical modeling of the wave field on the profile for comparison with experiment and verification of existing velocity model of the crust of the Baikal region and northern Mongolia are done.

Key words: vibroseismic studies, seismic vibrator, wave fields, profile Babushkin – Ulaanbaat.

В последнее десятилетие в рамках проектов СО РАН и РФФИ выполнено исследование характеристик вибросейсмического поля мощного 100-тонного вибрационного сейсмического источника, расположенного на Южнобайкальском геодинамическом полигоне СО РАН, для целей глубинного вибросейсмического зондирования Монголо-Сибирского региона в зоне сочленения Байкальского рифта и Центрально-Азиатского подвижного пояса [1-3]. Методической основой работ является регистрация вибросейсмических сигналов на региональных профилях протяженностью до 500 км малыми сейсмическими группами (антеннами) с трехкомпонентными сейсмоприемниками и использование специализированного программного обеспечения для выделения вибрационных зондирующих сигналов и пространственной селекции приходящих волн на больших расстояниях [4-6]. Работы по исследованию характеристик вибросейсмического поля мощного вибратора на профиле Байкал–Улан-Батор проводились ИВМиМГ СО РАН, ГИН СО РАН, БурФ ГС СО РАН (Россия) и ИЦАГ АНМ (Монголия).

В 2011–2013 гг. проведены экспериментальные работы по исследованию характеристик волнового поля сейсмовибратора в режиме излучения свип-сигналов и гармонических сигналов с регистрацией излучаемых волн на двух

региональных профилях: Бабушкин–Сухэ-Батор–Дархан–Улан-Батор от 205 км до 500 км в южном направлении от источника и Бабушкин–Сухэ-Батор–Орхон-Тола от 205 км до 356 км в юго-юго-западном направлении от источника на монгольской территории. Также проведена регистрация вибросигналов на профиле на российской территории на расстоянии 65 км, 120 км и 162 км от источника (рис. 1).

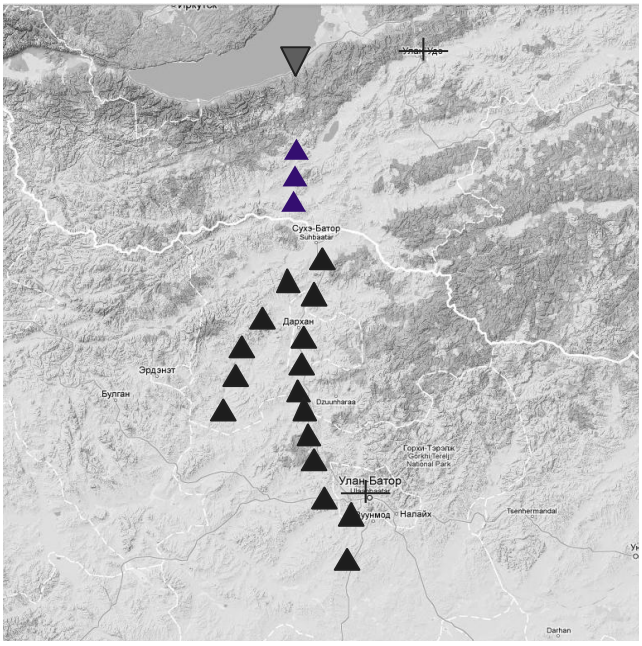


Рис. 1. Общая схема экспериментальных работ на профиле Бабушкин – Улан-Батор. Точки регистрации – синие треугольники, вибратор ЦВО-100 – красный треугольник

Регистрация вибросейсмических сигналов в каждой точке профиля осуществлялась малой сейсмической группой из 6 регистраторовов Байкал с трехкомпонентными сейсмическими датчиками СК1-П, координатная привязка по GPS. Расстановка датчиков линейная с расстоянием между датчиками 200 м и общей базой малой сейсмической группы 1 км. Непрерывная регистрация сейсмических сигналов проводилась в ночное время в течение семи часов (с 15:00 по 22:00 по GMT) в каждой точке регистрации. Одновременно проводилась регистрация вибросейсмических сигналов вблизи источника аппаратурой Байкал с трехкомпонентным сейсмическим датчиком СК1-П.

Для выделения вибрационных зондирующих сигналов и пространственной селекции приходящих волн было использовано специализированное программное обеспечение на базе программы обработки вибросигналов V12, созданной в ИВМиМГ СО РАН. В алгоритмах обработки используется пространственная фильтрация, основанная на определении степени синфазности волн с определенным волновым числом на различных датчиках группы во временном окне, перемещающимся вдоль сейсмограммы. Применение пространственной фильтрации для обработки данных сейсмической группы оказалось очень эффективным для выделения основных групп волн (сейсмических фаз) и подавления

волн-помех. В программе V12 применены графические средства отображения текущих амплитуд сейсмограмм после преобразования Гильберта. Это позволяет получать из сейсмограмм наглядные волновые карты участков P и S волн (рис. 2). Применение малых групп при регистрации вибросигналов и разработанных программ обработки позволило выделить вибрационные зондирующие сигналы на удалении до 500 км от источника и выполнить пространственную селекцию приходящих волн на полученных вибрационных сейсмограммах.

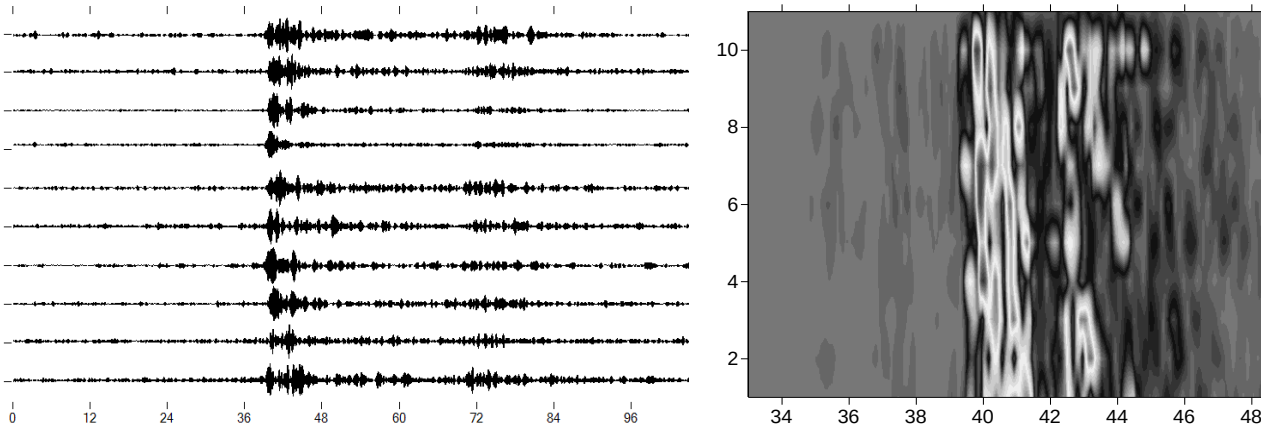


Рис. 2. Вибрационная сейсмограмма на расстоянии от источника 241 км – слева. Графическое отображение амплитуд P волн – справа

Редуцированный годограф для группы P волн представлен на рис. 3. Скорость редукции 8 км/с. Точками отмечены времена первых четырех максимумов колебаний в группе P волн.

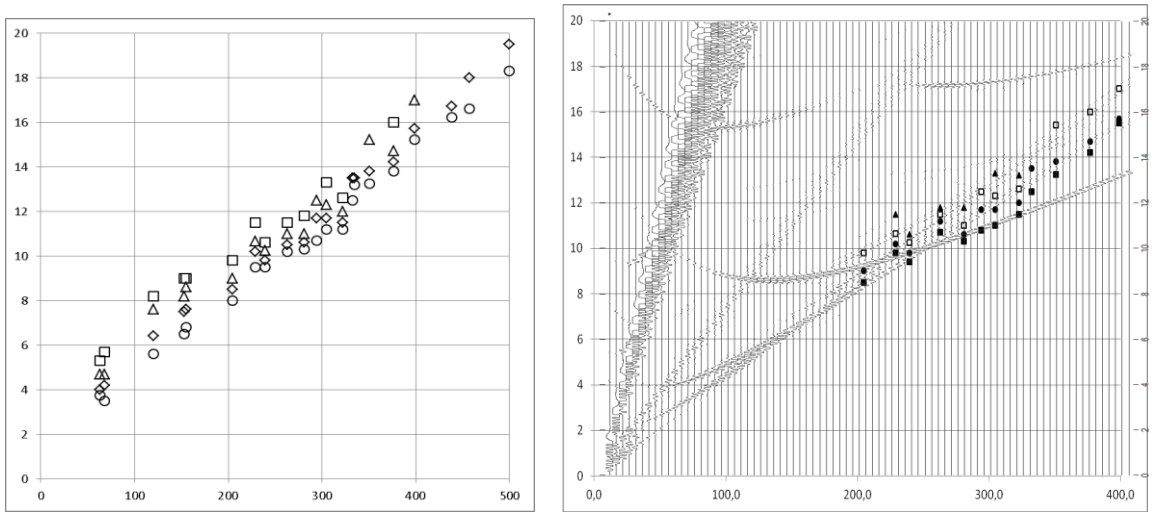


Рис. 3. Времена вступлений волн по первым 4 максимумам вибрационных сейсмограмм – слева. Теоретические годографы для 5-слойной модели земной коры и экспериментальные данные – справа. Скорость редукции 8 км/с

Вместе с экспериментальными работами были выполнены теоретические исследования формирования волнового поля для модели земной коры примени-

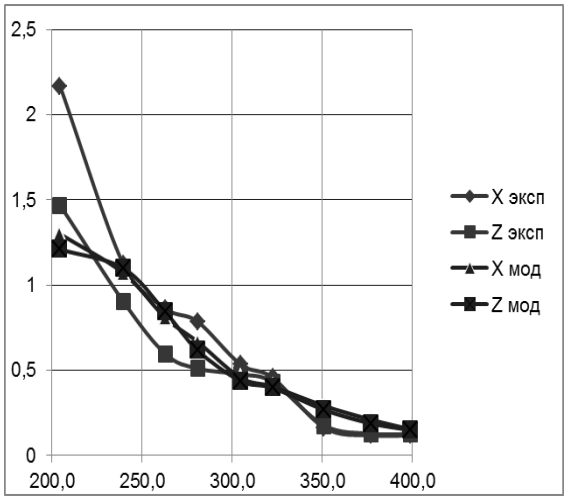


Рис. 4. График затухания амплитуд волн, эксперимент и результат моделирования

тельно к профилю Байкал – Улан-Батор [7,8]. Подготовлена программа и проведено математическое моделирование волнового поля на профиле регистрации для сравнения с экспериментом и верификации существующей скоростной модели земной коры Прибайкалья и северной Монголии (рис. 3).

Важным результатом явилось также определение зависимости амплитуд Р-волн от расстояния, которое для расстояний 200-500 км было получено в экспериментальных работах на 500-км профиле и также подтверждено результатами математического моделирования (рис. 4).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 15-07-06821-а, № 14-07-00832, ИП СО РАН 54.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А.С.Алексеев [и др.]; отв. ред. Г.М. Цибульчик. – Новосибирск : ИВМиМГ СО РАН, филиал «Гео» изд-ва СО РАН, 2004. – 387 с.

2. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Кашун В.Н., Татьков Г.И. Эксперименты по вибросейсмическому мониторингу земной коры // Проблемы региональной геофизики. – Новосибирск, 2001. – С. 55–57.

3. Крылов С.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф. Изучение Байкальской рифтовой впадины методом сейсмической томографии на преломленных волнах // Докл. АН. – 1995. – Т. 345, № 5. – С. 674-677.

4. Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П. Информационно-аналитическая система для вибросейсмических исследований. // Проблемы информатики. – 2013. – № 3. – С. 22–29. ISSN 2073-0667.

5. Б.Г. Михайленко, Б.М. Глинский, Х.Х. Имомназаров, В.В. Ковалевский, Л.Е. Собисевич, А.Л. Собисевич, М.С. Хайретдинов. Методы активной сейсмологии в задачах мониторинга глубинного строения Земли. В кн.: Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1: Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений, ИФЗ РАН – М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 89 -130.

6. A. Alekseev, G. Tsibulchik, V. Kovalevsky, and A. Belonosov. Elements of active geophysical monitoring theory. Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, Volume 40, Active geophysical monitoring, Elsevier, 2010, pp. 55-71.

7. Фатьянов А.Г. Аналитическое моделирование сейсмических волновых полей и волновой метод подавления кратных волн Технологии сейсморазведки. 2010. № 2. С. 16-22.

8. Бурмин В.Ю., Фатьянов А.Г. Аналитическое моделирование волновых полей на сверхдальние расстояния и экспериментальные исследования водных волн Физика Земли. 2009. № 4. С. 43-55.

© В. В. Ковалевский, Ц. А. Тубанов, А. Г. Фатьянов, Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, А. Д. Базаров, 2015

УДК 519.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПОЛЕЙ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СУММАРНОГО МЕСЯЧНОГО КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ В РАЙОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Нина Александровна Каргаполова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)330-77-56, e-mail: nkargapolova@gmail.com

В работе приведены результаты исследования статистической структуры полей среднемесячной приземной температуры воздуха и суммарного за месяц количества осадков в районе озера Байкал. Исследования проведены с использованием данных многолетних наблюдений. Полученные результаты могут быть основой для построения стохастических моделей полей, учитывающих годовой ход и неоднородность реальных процессов.

Ключевые слова: пространственно-временное поле, моделирование неоднородного поля, Байкал, осадки, температура воздуха.

ANALYSIS OF STATISTICAL STRUCTURE OF SPATIAL-TIME FIELDS OF AVERAGE MONTHLY TEMPERATURE AND MONTHLY PRECIPITATION SUMS IN THE LAKE BAIKAL REGION

Nina A. Kargapolova
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), junior research scientist, tel. (383)330-77-56, e-mail: nkargapolova@gmail.com

Several pieces of information on statistical structure of random fields of average monthly temperature and monthly precipitation sums are given in this paper. Information is obtained on basis of real data from weather stations situated in Lake Baikal region. Obtained results can be used for numerical stochastic simulation of meteorological random fields with respect to seasonal variations and heterogeneity of natural processes.

Key words: spatially-temporal field, heterogeneous field simulation, Baikal, precipitation, air temperature.

Для исследования экстремальных режимов выпадения осадков, для решения гидрологических задач о водосборе и стоках, для оценки вероятностей возникновения пожаро- и паводкоопасных температурных режимов реальных данных, собранных на метеостанциях, бывает недостаточно. Действительно, редкая сеть метеостанций не позволяет получить корректные данные об осадках и температуре между станциями, а короткий период наблюдений негативно влияет на точность оценок характеристик редких явлений. Естественным решением в таких ситуациях является использование имитационных стохастических моделей полей метеоэлементов, основанных на реальных данных, позволяющих численно моделировать пространственно-временные поля, обладающие такой же статистической структурой как у полей реальных данных. Некоторые

описания моделей и результаты моделирования приведены в [1–4]. Следует отметить, что к настоящему времени разработано множество методов стохастического моделирования случайных процессов с заданными вероятностными характеристиками.

В данной работе приведены результаты исследования статистической структуры полей среднемесячной приземной температуры воздуха и суммарного за месяц количества осадков на территории площадью $1.4 \cdot 10^6$ км^2 в районе озера Байкал. Были использованы данные реальных наблюдений температуры воздуха и суммарного количества выпавших за сутки осадков на 33 метеорологических станция в период с 1978 по 2009 гг. По этим данным были получены значения для среднемесячных температур и суммарных осадков за месяц. На рис. 1 представлена карта исследуемого региона, на которой точками отмечено положение метеостанций.

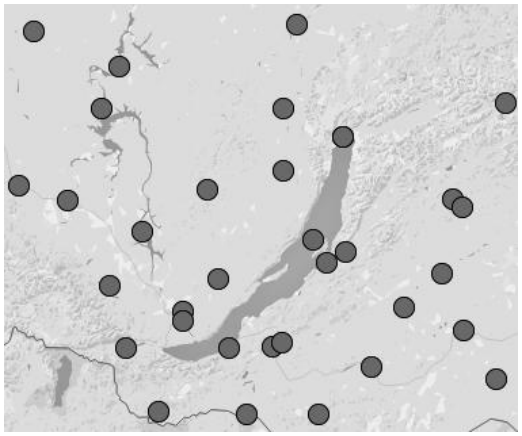


Рис. 1. Фрагмент карты исследуемой территории с указанным местоположением метеостанций

Анализ показывает, что случайные поля среднемесячных температур и суммарных осадков за месяц не являются пространственно однородными по распределениям, т.е. в различных точках рассматриваемой области одномерные распределения различаются. Кроме того, одномерные распределения, как функции времени, обладают выраженной годовой изменчивостью. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены оценки математического ожидания среднемесячной температуры и суммарного месячного количества осадков на 2 метеостанциях.

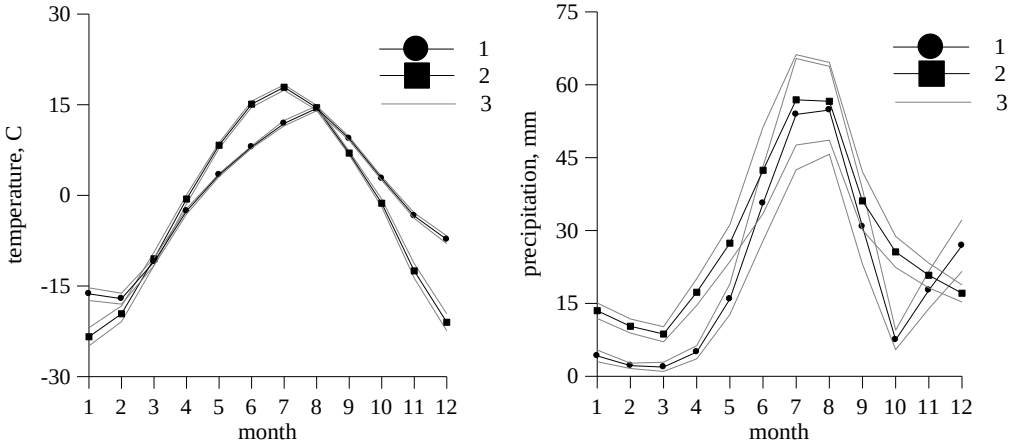


Рис. 2. Оценка математического ожидания среднемесячной температуры и суммарного за месяц количества осадков:

кривая 1 – данные с метеостанции на о. Большой Ушканий; кривая 2 – данные с метеостанции в с. Червянка; кривая 3 – соответствующие доверительные интервалы с уровнем доверия 0.9

При построении условных стохастических моделей на некоторой сетке возникает вопрос о выборе метода интерполяции данных со станций в узлы сетки. Выбор метода интерполяции можно произвести на основе минимизации значений некоторых функционалов от интерполированных и истинных значений в тех точках поля, где истинные значения известны. В качестве функционалов в данной работе были выбраны относительная погрешность интерполяции и среднеквадратическая ошибка интерполяции на станции, осреднённые по всем станциям в конкретные месяцы. Среди прочих рассматривались следующие методы интерполяции:

1. NN – интерполяция методом «из ближайшего соседа». Для каждого узла A сетки выбиралась ближайшая (в смысле расстояния на плоскости) станция, и значению метеоэлемента X (температуры или количества осадков) в рассматриваемой точке A присваивалось значение этого элемента на выбранной станции.

2. D – линейная весовая интерполяция с весами, обратно пропорциональными расстоянию между точкой, куда производится интерполяция и точками откуда интерполируют. Формально этот способ интерполяции можно описать следующим образом: если X – неизвестное значение метеоэлемента в узле A, X_j, $j=1,\ldots,n$ – известные значения метеоэлемента на станциях A_j, $j=1,\ldots,n$, то X определяют равным

$$X=\sum_{j=1}^{n} p_j X_j \Big/ \sum_{j=1}^{n} p_j,\ \ p_j = 1/dist\ \ A,A_j\ \ ,$$

где $dist\ \ A,A_k\ \ $ – расстояние между точками A и A_k.

3. SD – весовая интерполяция с весами, обратно пропорциональными квадрату расстояния между точкой, куда производится интерполяция и точками откуда интерполируют, т.е.

$$X=\sum_{j=1}^{n} p_j X_j \Big/ \sum_{j=1}^{n} p_j,\ \ p_j = 1/dist^2\ \ A,A_j\ \ .$$

В табл. 1, 2 приведены примеры значений среднеквадратической ошибки интерполяции полей температуры и осадков в различные месяцы с помощью рассмотренных методов интерполяции. Для большинства месяцев наилучшую интерполяцию поля температуры даёт метод D, а для интерполяции поля осадков – метод SD.

Оценки пространственных коэффициентов корреляции исследуемых полей осадков дают основание полагать, что предположение об однородности полей по корреляциям является оправданным. Для поля среднемесячной температуры предположение о его изотропности хорошо согласуется с реальными данными. При этом, поля температуры и осадков обладают ярко выраженным свойством периодической коррелированности по времени (с периодом равным 12 месяцам).

Таблица 1

Среднеквадратическая ошибка интерполяции поля температуры, ^{o}C

месяц	Метод интерполяции		
	N	D	SD
январь	3.69	3.10	3.19
март	1.72	1.59	1.61

Таблица 2

Среднеквадратическая ошибка интерполяции поля осадков, мм

месяц	Метод интерполяции		
	N	D	SD
март	5.23	4.85	1.61
сентябрь	19.76	19.31	19.02

Для построения стохастической модели поля на сетке необходимо аппроксимировать коэффициенты корреляции, оцененные по реальным данным, некоторыми корреляционными функциями, описывающими структуру поля в произвольных точках рассматриваемой области. Для пространственного поля суммарных месячных осадков наилучшую аппроксимацию (в смысле минимума суммы квадратов отклонений оценок коэффициентов корреляции между станциями от аппроксимирующей функции) дает функция вида

$$r\ \ x_1, x_2, y_1, y_2\ \ = r\ \ x_1 - x_2, y_1 - y_2\ \ = r\ \ x, y\ \ = \exp\ -\ ax^2 + bxy + cy^2\ \ ^q\ \ ,$$

где x_1, y_1 , x_2, y_2 – координаты точек. Функцию такого типа часто используют при описании корреляционной структуры пространственных полей сумм жидких осадков [5]. В табл. 3 приведены коэффициенты a, b, c, q, при которых достигается минимум среднего квадрата разности между фактической и аппроксимирующей функциями для некоторых месяцев.

Таблица 3

Оптимальные параметры аппроксимирующей корреляционной функции.

Месяц	a	b	c	q
май	0.02	-0.02	0.01	0.07
июль	0.01	0.04	0.04	0.03

Коэффициенты корреляции поля среднемесячной температуры хорошо аппроксимируются функциями вида

$$r_1\ \ x_1, x_2, y_1, y_2\ \ = r_1\ \ \rho\ \ = \exp\ -\beta\rho\ \ ,$$

$$r_2\ \ x_1, x_2, y_1, y_2\ \ = r_2\ \ \rho\ \ = \lambda \Big/\ \ \rho^2 + \lambda\ \ ,$$

где $\rho = \sqrt{\ x_1 - x_2\ ^2 +\ \ y_1 - y_2\ ^2}$, а β, λ – положительные параметры. В табл. 4 даны оптимальные значения коэффициентов β, λ для различных месяцев.

Таблица 4

Оптимальные параметры аппроксимирующей корреляционной функции.

Месяц	β	λ
январь	0.00084	1883190
май	0.00057	1741140
июль	0.00095	1144200
октябрь	0.00049	1673820

Моделирование полей с корреляционными функциями вида $r_1(\rho)$ и $r_2(\rho)$ можно осуществлять с помощью эффективных алгоритмов, предложенных в [5, 6].

Подводя итоги исследования, можно сказать, что условные поля среднемесячной температуры и суммарных месячных осадков необходимо моделировать с учетом их пространственной неоднородности по распределениям и периодической изменчивости характеристик полей по времени. Для моделирования полей среднемесячной температуры целесообразно использовать предположение об их изотропности по корреляциям, а для моделирования полей осадков – предположение об их пространственной однородности по корреляциям. При разработанных к настоящему времени алгоритмах моделирования полей с такими свойствами, задача моделирования рассматриваемых полей и оценки их характеристик представляется несложно решаемой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты No. 15-01-01458-а, 15-01-08988-а) и грантом No. НШ-5111.2014.1 Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kleiber W., Katz R.W., Rajagopalan B. Daily spatiotemporal precipitation simulation using latent and transformed Gaussian processes // Water Resour. – 2012. – No 1 (48). – P. 1523–1534.

2. Srikanthan R., McMahon T.A. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review // Hydrology and Earth System Sciences. – 2001. – No 4 (5). – P. 653–670.

3. Ogorodnikov V.A., Kargopolova N.A., Seresseva O.V. Numerical stochastic model of spatial fields of daily sums of liquid precipitation // Russ. J. Num. Anal. Math. Modelling. – 2013. –No 2 (28). – P. 187–200.

4. Ogorodnikov V.A., Kargapolova N.A., Seresseva O.V. Numerical stochastic models of meteorological processes and fields // Springer Proceedings in Mathematics & Statistics: Topics in Statistical Simulation. – New York, 2014. – P. 417–424.

5. Гандин Л.С. Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 359с.

6. Огородников В.А. Моделирование одного класса изотропных гауссовских полей // Сб. научных трудов «Теория и приложения статистического моделирования». – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР.– 1988. – С. 25–30.

7. Ambos A. Yu., Mikhailov G.A. New algorithms of numerical-statistical modelling of radiative transfer through stochastic mediums and radiation models homogenization // Rus. J. Num. Anal. Math. Model. – 2014. – No 6 (29). – P. 331–339.

© Н. А. Каргаполова, 2015

УДК 550.34

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ДИЛАТАНСИИ ДЛЯ СОВМЕЩЕННОЙ МОДЕЛИ ВЯЗКОУПРУГОСТИ И ПОРОУПРУГОСТИ

Холматжон Худайназарович Имомназаров
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sscc.ru

Александр Анатольевич Михайлов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-83-52, e-mail: alex_mikh@omzg.sscc.ru

В статье предложен алгоритм численного моделирования распространения сейсмического волнового поля в вязкоупругой и в пористой среде с учётом диссипации энергии. Рассматривается совмещенная модель неоднородной среды, составленная из изотропных вязкоупругих и пористых слоёв. Исходная задача записывается в виде динамических уравнений распространения волнового поля. Уравнения для пористой среды записаны в терминах компонент скоростей смещений, напряжений и порового давления с учётом диссипации энергии. Распространение волн в вязкоупругой среде записывается системой уравнений через взаимосвязь компонент вектора скорости смещений и компонент тензора напряжений, используя принцип суперпозиции Больцмана в интегралах свёртки с функциями последействия. Для решения задачи предлагается метод на основе совместного использования спектрального метода Лагерра по времени и конечно-разностной аппроксимации по пространственным координатам. Приводится описание численной реализации предлагаемого алгоритма и анализируются его эффективность при расчетах. Также исследованы области дилатансии для разных источников возбуждения.

Ключевые слова: области дилатансии, сосредоточенная сила, вязкоупругая и пористая среда, медленная волна, преобразования Лагерра.

NUMERICAL MODELING OF THE DILATANCY FIELDS FOR A COMBINED MODEL OF A VISCOELASTIC AND POROELASTIC MEDIA

Kholmatzhon Kh. Imomnazarov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Doctor of Science, Leading Researcher, tel. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sscc.ru

Aleksander A. Mikhailov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Candidate of Science, Researcher, tel. (383)330-83-52, e-mail: alex_mikh@omzg.sscc.ru

In the present work, an algorithm to solve numerically the dynamic problem of seismic waves propagation for the combined mathematical model of viscoelastic and porous medium with allowance for energy dissipation is considered. The propagation of seismic waves in a fluid-saturated porous medium with energy loss is described by a system of first-order differential equations in a Cartesian system of coordinates. The initial system is written as a hyperbolic system in terms of the

velocities of the elastic medium and saturating fluid, components of the stress tensor and fluid pressure. Mathematical statement of the problem of seismic wave propagation in a viscoelastic medium is written as a system of first-order equations in terms of a relation between the displacement velocity vector and stress tensor components using the Boltzmann superposition principle in convolution integrals with relaxation functions. This makes it possible to consider general relations between stress and strain by specifying arbitrary relaxation functions. To solve this problem numerically, a algorithm for combining the integral Laguerre transform with respect to time with a finite-difference approximation along the spatial coordinates is used. The algorithm used for the solution makes it possible to perform efficient calculations in simulation of a complicated combined viscoelastic and porous medium and study wave effects emerging in such media. Also, explore the dilatancy domain for different excitation sources.

Key words: dilatancy domain, concentrated force, viscoelastic and porous media, slow wave, Laguerre transform.

Система уравнений, описывающая распространение сейсмических волн в пористой среде насыщенной флюидом при наличии потери энергии для Декартовой системы координат описывается следующей системой дифференциальных уравнений [1-3]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{1}{\rho_{0,s}}\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}+\frac{\rho_{0,l}}{\rho_{0,s}\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\rho_{0,l}}{\rho_{0,s}}\chi\rho_{0,l}(u_i-v_i)=F_i, \tag{1}$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x_i}-\chi\rho_{0,l}(u_i-v_i)=F_i, \quad \frac{\partial p}{\partial t}-\left(K-\alpha\rho_0\rho_{0,s}\right)div\vec{u}+\alpha\rho_0\rho_{0,l}\,div\vec{v}=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial t}+\mu\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)+\left(\frac{\rho_{0,s}}{\rho_0}K-\frac{2}{3}\mu\right)\delta_{ik}div\vec{u}-\frac{\rho_{0,s}}{\rho_0}K\delta_{ik}div\vec{v}=0. \tag{3}$$

Здесь $\rho_{0,s}$ - парциальная плотность пористого тела, $\rho_{0,l}$ - парциальная плотность жидкости, $\rho_0=\rho_{0,l}+\rho_{0,s}$, $\rho_{0,s}=\rho_{0,s}^f(1-d_0)$, $\rho_{0,l}=\rho_{0,l}^f d_0$, $\rho_{0,s}^f$ и $\rho_{0,l}^f$ - физические плотности упругого пористого тела и жидкости соответственно, d_0 - пористость, χ - коэффициент межфазного трения, δ_{ik} - символ Кронекера, p - поровое давление, σ_{ik} - тензор напряжений, $\vec{u}=(u_1,u_2)$ и $\vec{v}=(v_1,v_2)$ - вектора скоростей смещения частиц в пористом теле и жидкости соответственно, $\vec{F}=(F_1,F_2)$ - вектор массовых сил, $K=\lambda+2\mu/3, \lambda>0, \mu>0$ коэффициенты Ламе, $\alpha=\rho_0\alpha_3+K/\rho_0^2$, $\rho_0^3\alpha_3>0$ - модуль объемного сжатия жидкой компоненты гетерофазной среды. Упругие модули K, μ, α_3 выражаются через скорость распространения поперечной волны c_s и две скорости продольных волн c_{p_1}, c_{p_2} соответствующими формулами [4,5]:

$$\mu=\rho_{0,s}c_s^2, \qquad K=\frac{\rho_0}{2}\frac{\rho_{0,s}}{\rho_{0,l}}\left(c_{p_1}^2+c_{p_2}^2-\frac{8}{3}\frac{\rho_{0,l}}{\rho_0}c_s^2-\sqrt{\left(c_{p_1}^2-c_{p_2}^2\right)^2-\frac{64}{9}\frac{\rho_{0,l}\rho_{0,s}}{\rho_0^2}c_s^4}\right),$$

$$\alpha_3=\frac{1}{2\rho_0^2}\left(c_{p_1}^2+c_{p_2}^2-\frac{8}{3}\frac{\rho_{0,s}}{\rho_0}c_s^2+\sqrt{\left(c_{p_1}^2-c_{p_2}^2\right)^2-\frac{64}{9}\frac{\rho_{0,l}\rho_{0,s}}{\rho_0^2}c_s^4}\right).$$

Распространение сейсмических волн в вязкоупругой среде записывается через взаимосвязь компонент вектора скорости смещений и компонент тензора

напряжений системой уравнений первого порядка, используя принцип суперпозиции Больцмана в интегралах свёртки с функциями последействия. Математическая постановка задачи в Декартовой системе координат приводит к системе уравнений вида [6]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}=F_i f(t), \qquad \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial t}+\mathrm{M}\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)+\delta_{ik}\Lambda div\vec{u}=0. \tag{4}$$

Здесь δ_{ij} - символ Кронекера, $\rho_0(x_1,x_2)$ - плотность среды, $\vec{u}=(u_1,u_2)$ - вектор скорости смещений, σ_{ij} - компоненты тензора напряжений. $\vec{F}(x_1,x_2)=F_1\vec{e}_x+F_2\vec{e}_z$ описывает распределение локализованного в пространстве источника, а $f(t)$ - заданный временной сигнал в источнике. Λ и M - интегральные операторы следующего вида:

$$\Lambda w(t)=\lambda w(t)-\hat{\lambda}\int_{-\infty}^{t} w(\tau)\gamma(t-\tau)d\tau, \quad \mathrm{M}w(t)=\mu w(t)-\hat{\mu}\int_{-\infty}^{t} w(\tau)\eta(t-\tau)d\tau, \tag{5}$$

где $\lambda(x_1,x_2)$, $\mu(x_1,x_2)$ - упругие параметры среды; $\hat{\lambda}(x_1,x_2)$, $\hat{\mu}(x_1,x_2)$ - параметры неупругости среды; $\gamma(t)$, $\eta(t)$ - некоторые функции последействия.

Следовательно, задача для совмещённой математической модели пористой и вязкоупругой среды может быть записана системой уравнений вида:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{1}{\rho_{0,s}}\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}+\Pi\frac{\rho_{0,l}}{\rho_{0,s}}\left[\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\chi\rho_{0,l}(u_i-v_i)\right]=F_i f(t), \tag{6}$$

$$\Pi\left[\frac{\partial v_i}{\partial t}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x_i}-\chi\rho_{0,l}(u_i-v_i)=F_i f(t)\right], \quad \Pi\left[\frac{\partial p}{\partial t}-\left(K-\alpha\rho_0\rho_{0,s}\right)div\vec{u}+\alpha\rho_0\rho_{0,l}\,div\vec{v}\right]=0, \tag{7}$$

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial t}+\mathrm{M}\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)+\left(\frac{\rho_{0,s}}{\rho_0}K-\frac{2}{3}\mathrm{M}\right)\delta_{ik}div\vec{u}-\Pi\frac{\rho_{0,s}}{\rho_0}K\delta_{ik}div\vec{v}=0. \tag{8}$$

Задача решается при нулевых начальных данных

$$u_i\big|_{t=0}=v_i\big|_{t=0}=\sigma_{ij}\big|_{t=0}=p\big|_{t=0}=0 \tag{9}$$

и граничных условиях на свободной поверхности при $x_2=0$

$$\sigma_{22}+p\big|_{x_2=0}=\sigma_{12}\big|_{x_2=0}=\frac{\rho_{0,l}}{\rho_0}p\Big|_{x_2=0}=0. \tag{10}$$

Пример результатов расчёта волнового поля для совмещённой модели вязкоупругой и пористой сред представлен на рисунке 1. В качестве модели была задана среда состоящая из трёх однородных слоёв: верхний слой – упругая среда; нижний левый слой – пористая среда; нижний правый слой – вязкоупругая среда. Физические характеристики слоёв были заданы следующими:

1) верхний упругий слой – $\rho=1.2$ г/см^3, $c_p=1.4$ км/сек, $c_s=1$ км/сек;

2) нижний правый вязкоупругий слой с заданными функциями последействия – $\rho=1.5$ г/см^3, $c_p=1.9$ км/сек, $c_s=1.3$ км/сек, $\mathrm{Q}_P=80$, $\mathrm{Q}_S=50$;

3) нижний левый пористый слой с поглощением – $\rho_{0,s}^f=1.5$ г/см^3, $\rho_{0,l}^f=1$ г/см^3, $c_{p_1}=1.9$ км/сек, $c_{p_2}=0.4$ км/сек, $c_s=1.3$ км/сек, $d=0.1$, $\chi=100$ см^3/(г·сек).

Времена релаксаций подбирались так, чтобы задать значения добротности $Q_P = 80$ для продольной волны и $Q_S = 50$ для поперечной волны в частотном диапазоне моделируемого сигнала в источнике. Толщина верхнего упругого слоя – 0.6 км. Вертикальная граница раздела между пористыми слоями проходит по линии $x_1 = 0.7$ км. Волновое поле моделировалось от точечного источника типа центра расширения с координатами $x_1 = 0.7$ км, $x_2 = 0.5$ км, расположенным в верхнем упругом слое. Временной сигнал в источниках задавался в виде импульса Пузырёва:

$$f(t) = exp\left(-\frac{2\pi\ f_o(t-t_0)^2}{\gamma^2}\right) sin(2\pi\ f_0(t-t_0)),$$

где $\gamma = 4$, $f_0 = 30\,\text{Гц}$, $t_0 = 0.05\,\text{сек}$.

На рис. 1 изображен мгновенный снимок волнового поля для вертикальной компоненты скорости смещений $u(x_1, x_2)$ в фиксированный момент времени при $T = 0.4$ секунды. Из рисунка видно, что в нижнем левом пористом слое присутствует вторая продольная волна $c_{p_2} = 0.4$ км/сек, а в правом вязкоупругом слое распространяется только поперечная и одна продольная волны имеющие заданное поглощение.

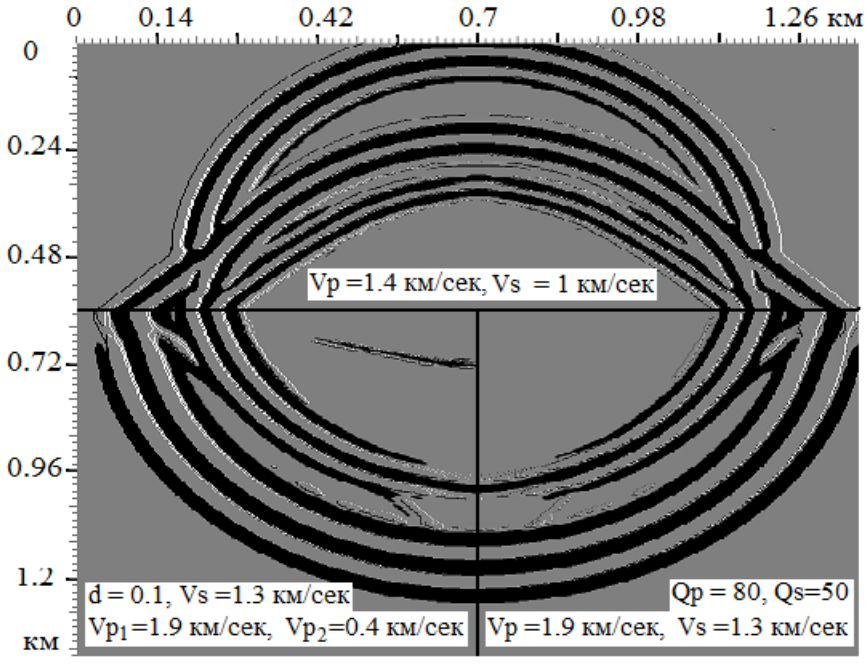


Рис. 1. Численный снимок волнового поля для вертикальной компоненты скорости смещений $u(x_1, x_2)$ в момент времени *t=0.4 секунды*

Границы раздела слоёв показаны сплошной линией. Верхний слой – упругая среда, левый нижний – пористый слой, правый нижний – вязкоупругий слой. Также проведены серия тестовых численных расчетов для определения области дилатансии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 13-01-00689-а, ИП СО РАН 54.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доровский В.Н., Перепечко Ю.В., Роменский Е.И. Волновые процессы в насыщенных пористых упругодеформируемых средах // Физика горения и взрыва – 1993. – № 1. – С. 100–111.

2. Blokhin A.M., Dorovsky V.N. Mathematical modelling in the theory of multivelocity continuum. –New York: Nova Science, 1995.

3. .Imomnazarov Kh.Kh. A Mathematical Model for the Movement of a Conducting Liquid Through a Conducting Porous Medium: I. Excitation of Oscillations of the Magnetic Field by the Surface Rayleigh Wave // Math. Comput. Modeling – 1996. – Vol. 24. – № 1. – P. 79–84.

4. Имомназаров Х.Х. Несколько замечаний о системе уравнений Био // Доклады РАН – 2000. – Т. 373. – № 4. – С. 536–537.

5. Imomnazarov Kh.Kh. Some Remarks on the Biot System of Equations Describing Wave Propagation in a Porous Medium // Appl. Math. Lett. – 2000. – Vol. 13. – № 3. – P. 33–35.

6. Carcione J.M., Kosloff D. and Kosloff R. Wave propagation simulation in a linear viscoelastic medium. // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. – 1988. – № 95. – P.597–611.

7. Имомназаров Х.Х., Михайлов А.А. Применение спектрального метода для численного моделирования сейсмических волн в пористых средах при наличии диссипации энергии // СибЖВМ, 2014, Т. 17, №2, с. 139-147.

© Х. Х. Имомназаров, А. А. Михайлов, 2015

УДК 550.34

СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛА В ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Холматжон Худайназарович Имомназаров
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sscc.ru

Сайера Тахировна Туйчиева
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, 100167, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Адилходжаева, 1, старший преподаватель, тел. (371)276-88-71, e-mail: icenter@tashiit.uz

В статье получены решения системы динамических уравнений пороупругости для простых сил. Отметим, что полученные решения позволяют изучить области дилатансии в насыщенных жидкостью пористых средах. При этом полученные формулы позволяют моделировать скорости смещений пористого каркаса и насыщающей жидкости в нем, а также порового давления и компоненты тензора напряжений, как при заданных упругих параметрах среды, так и в заданных скоростях распространений поперечных и продольных волн в пористой среде.

Ключевые слова: области дилатансии, сосредоточенная сила, пористая среда, медленная волна, фундаментальный тензор.

CONCENTRATED FORCE IN A HOMOGENEOUS ISOTROPIC POROUS MEDIUM

Kholmatzhon Kh. Imomnazarov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Doctor of Science, Leading Researcher, tel. (383)330-83-52, e-mail: imom@omzg.sscc.ru

Sayyora T. Tuychieva
Tashkent Institute of Railway Transport Engineers, 100167, Uzbekistan, Tashkent, 1 Adilkhodjaev st., senior lecturer, tel. (371)276-88-71, e-mail: icenter@tashiit.uz

In this paper, a solution of a system of dynamic poroelasticity equations for simple forces is obtained. One should note that the resulting solution allows the exploration of the dilatancy field in fluid-saturated porous media. In this case, the formula obtained allows us to simulate the displacement velocity of the a porous body and saturating fluid in it, as well as the pore pressure and stress tensor components with given elastic parameters of the medium, and with the prescribed propagation velocity of transverse and longitudinal waves in this porous medium.

Key words: dilatancy domain, concentrated force, the porous medium, slow wave, fundamental tensor.

Большинство встречающихся в природе и используемых в науке и технике сред не являются однофазными и не могут быть отнесены к классу жидкостей, газов или твердых упругодеформируемых тел. Отличия в свойствах отдельных

фаз, составляющих среду, и межфазные взаимодействия играют определяющую роль в динамике таких сред.

Теоретическое и экспериментальное исследования волновых процессов в упругодеформируемой пористой среде, насыщенной жидкостью или газом, является актуальным и существенно для развития представлений о процессах, сопровождающих применение современных технологий использования пористых сред. К настоящему времени для теоретического исследования распространения волн в упругодеформируемой, пористой, насыщенной жидкостью среде имеется ряд подходов, из которых следует упомянуть теорию типа Френкеля-Био [1-3]. Данная математическая модель имеет ряд недостатков [4] и, кроме того, не ясна возможность ее обобщения на случай конечных деформаций упругого скелета. В [5] отмечено, что произвольные изменения четырех параметров среды приводят к нефизичным результатам. Феноменологический подход, основанный на общих первых физических принципах, был использован при построении модели течения жидкости в упругой пористой среде для случая конечных деформаций [6]. Отметим, что система определяющих дифференциальных уравнений, построенных в [6], является гиперболической, однако привести все ее уравнения к симметрическому виду не удается. В [7] уравнения течения сжимаемой жидкости в упругой пористой среде выводятся с использованием метода термодинамически согласованных систем. Полученные дифференциальные уравнения образуют гиперболическую систему законов сохранения. Особенностью этих моделей является, наряду с распространением поперечной и продольной сейсмических волн, наличие медленной (второй) продольной волны.

Пусть пространство R^3 заполнено упруго-деформируемой изотропной пористой средой. Распространения сейсмических волн в такой среде описываются следующей системой динамических уравнений из [6]. Вектора скорости упругого скелета $\mathbf{u}$ и жидкости $\mathbf{v}$ удовлетворяют динамическим уравнениям для упругой и жидкой фаз в отсутствии диссипации энергии

$$\mathbf{u}_{tt} - c_t^2\Delta\mathbf{u} + \left(c_t^2 - a_1\right)\nabla\mathrm{div}\mathbf{u} + a_2\nabla\mathrm{div}\mathbf{v} = \mathbf{e}\rho^{-1}f(t)F_0\delta(\mathbf{x}-\boldsymbol{x}_0), \qquad (1)$$

$$\mathbf{v}_{tt} + a_3\nabla\mathrm{div}\mathbf{u} - a_4\nabla\mathrm{div}\mathbf{v} = \mathbf{e}\rho^{-1}f(t)F_0\delta(\mathbf{x}-\boldsymbol{x}_0), \qquad (2)$$

где $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$, $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)$, Δ, ∇ -- операторы Лапласа, градиента по $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ соответственно, $\mathbf{e} \in R^3$, коэффициенты $a_j, j = 1,2,3,4$ выражаются с одной стороны тремя упругими параметрами λ, μ, α и соответствующими парциальными плотностями упругой матрицы ρ_s, жидкости ρ_l [6, 8]

$$a_1 = \frac{\lambda+2\mu}{\rho_s} - \frac{2K}{\rho} + \alpha\rho_s, \quad a_4 = \alpha\rho_l, \quad K = \lambda + \frac{2}{3}\mu,$$

$$a_2 = \frac{\rho_l}{\rho}\left(\frac{K}{\rho_s} - \alpha\rho\right), \quad a_3 = \frac{K}{\rho} - \alpha\rho_s, \quad \rho = \rho_l + \rho_s,$$

с другой стороны тремя скоростями c_t, c_{l_1}, c_{l_2} и соответствующими парциальными плотностями упругой матрицы ρ_s, жидкости ρ_l [9, 10]

$$a_1 = \frac{\rho_l}{\rho}\left(c_{l_1}^2 + c_{l_2}^2\right) + \frac{4}{3}\frac{\rho_s}{\rho}c_t^2 + \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho}\tilde{z},$$

$$a_2 = \frac{\rho_l}{\rho}\left(c_{l_1}^2 + c_{l_2}^2 - 2\tilde{z} - \frac{4}{3}c_t^2\right), \qquad a_3 = \frac{\rho_s}{\rho}\left(c_{l_1}^2 + c_{l_2}^2 - 2\tilde{z} - \frac{4}{3}c_t^2\right),$$

$$a_4 = \frac{\rho_s}{\rho}\left(c_{l_1}^2 + c_{l_2}^2 - \frac{4}{3}c_t^2\right) - \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho}\tilde{z},$$

$$\tilde{z} = \frac{1}{2}\left(c_{l_1}^2 + c_{l_2}^2 - \frac{8}{3}\frac{\rho_s}{\rho}c_t^2\right) + \sqrt{\frac{1}{4}\left(c_{l_1}^2 - c_{l_2}^2\right)^2 - \frac{64}{9}\frac{\rho_l\rho_s}{\rho^2}c_t^4},$$

$f(t)$ - форма зондирующего сигнала.

В данной работе получены решения системы (1), (2) в частотной области

$$\hat{\mathbf{u}} = F_0\hat{f}(\omega)\mathbf{G}^u\mathbf{e}, \qquad \hat{\mathbf{v}} = F_0\hat{f}(\omega)\mathbf{G}^v\mathbf{e},$$

где

$$\mathbf{G}^u(\omega;\mathbf{x},\mathbf{x_0}) = \frac{1}{4\pi\mu(1+\rho_l/\rho_s)}\left[\mathbf{E}\frac{e^{-ik_tR}}{R} + \nabla\nabla\left(\frac{e^{-ik_tR}}{k_t^2R} - \nu_1\frac{e^{-ik_{l_1}R}}{k_t^2R} - \nu_2\frac{e^{-ik_{l_2}R}}{k_t^2R}\right)\right],$$

$$\mathbf{G}^v(\omega;\mathbf{x},\mathbf{x_0}) = \frac{1}{4\pi\omega^2\rho}\nabla\nabla\left[\frac{1}{R} - m_1\nu_1\frac{e^{-ik_{l_1}R}}{k_t^2R} - m_2\nu_2\frac{e^{-ik_{l_2}R}}{k_t^2R}\right],$$

$$\nu_1 = \frac{1-1/m_2}{1-m_1/m_2}, \qquad \nu_2 = \frac{1/m_2 - m_1/m_2}{1-m_1/m_2},$$

$$m_1 = \frac{a_3}{a_4 - c_{l_1}^2}, \qquad m_2 = \frac{a_3}{a_4 - c_{l_2}^2},$$

Таким образом, получены решения системы уравнений пороупругости в частотной области для сосредоточенного источника. Отметим, что при исчезновении пористости построенное решение переходит к решению системы уравнений линейной теории упругости в частотной области. Из построенных решений можно получить различные решения для разных сил в пористых, насыщенных жидкостью средах. Также из этих решений можно получить решения системы уравнений пороупругости во временной области.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 13-01-00689-а, ИП СО РАН 54.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Френкель Я.И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. - 1944. - т. 8, No 4. -С.133-150.

2. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low. Frequency Range // J. Acoust. Soc. Am. 1956, v. 28, No. 2 p.168-178.

3. Carcione J. M. Wave Fields in Real Media: Wave Propagation in Anisotropic, Anelastic Porous and Electromagnetic Media. N. Y.: Elsevier, 2007.

4. Жабборов Н.М., Имомназаров Х.Х. Некоторые начально-краевые задачи механики двухскоростных сред. Ташкент, 2012., 212 с.

5. Stoll R.D. Comments on "Biot model of sound propagation in water-saturated sand" // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V.103. P.2723-2725.

6. Blokhin A. M., Dorovsky V. N. Mathematical modeling in the theory of multivelocity continuum. N. Y.: Nova Sci., 1995.

7. Роменский Е.И. Термодинамически согласованная система законов сохранения течения сжимаемой жидкости в пористой упругой среде // Сибирский журнал индустриальной математики, 2011, Т.14, №4(48), с. 86-97.

8. Dorovsky V.N., Imomnazarov Kh.Kh. A Mathematical Model for the Movement of a Conducting Liquid Through a Conducting Porous Medium // Mathl. Comput. Modelling - 1994.v.20, No 7. p.91-97.

9. Имомназаров Х.Х. Несколько замечаний о системе уравнений Био // Доклады РАН. 2000, Т. 373, No.4, с.536-537.

10. Imomnazarov Kh.Kh. Some remarks on the Biot system of equations describing wave propagation in a porous medium // Appl. Math. Lett. 2000, v. 13, No. 3, p 33-35.

11. Купрадзе В.Д. и др. Трехмерные задачи математической теории упругости и термоупругости. - М. Наука, 1976г. 663с.

12. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Том 1. М., Мир, 1983.

© Х. Х. Имомназаров, С. Т. Туйчиева, 2015

УДК 551.465.45

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД НА СОСТОЯНИЕ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО ЛЬДА

Елена Николаевна Голубева
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел.(383)330-64-50, e-mail: elen@ommfao.sscc.ru

Геннадий Алексеевич Платов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел.(383)330-64-50, e-mail: plat@ommfao.sscc.ru

Дина Фаруковна Якшина
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел.(383)330-64-50, e-mail: yusupova.dina.f@gmail.com

Результаты численного эксперимента показывают, что на распределение и толщину арктического морского льда оказывают влияние атлантические воды, поступающие в СЛО. Несмотря на то, что эти воды не являются поверхностными, они могут передавать свое тепло вышележащим слоям. Особенно это проявляется в приатлантическом секторе СЛО, где положение кромки льда отражает траекторию поступающих двух ветвей атлантических вод.

Ключевые слова: Арктика, атлантические воды, изменение климата, морской лед, Северный Ледовитый океан, численное моделирование, циркуляция вод.

A NUMERICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF THE ATLANTIC WATER ON THE ARCTIC SEA ICE STATE

Elena N. Golubeva
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Dr. Phys.-Math. Sci., leading scientist, tel. (383)330-64-50, e-mail: elen@ommfao.sscc.ru

Gennady A. Platov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Dr. Phys.-Math. Sci., leading scientist, tel. (383)330-64-50, e-mail: plat@ommfao.sscc.ru

Dina F. Iakshina
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, junior scientist, tel. (383)330-64-50, e-mail: yusupova.dina.f@gmail.com

Numerical results show that the Atlantic waters, entering the Arctic Ocean, affect the distribution and thickness of the Arctic sea ice. Despite the fact that these waters are not distributed in the surface layer, they can heat the upper ocean layers from below. This is particularly evident on the border of the Arctic and the Atlantic, where the ice edge position coincides with the trajectories of the two incoming branches of the Atlantic waters.

Key words: Arctic Ocean, Atlantic waters, circulation, numerical modeling, sea ice, climate change.

Введение

В течение последних десятилетий в Северном Ледовитом океане происходит постепенное сокращение объема многолетнего льда и переход к доминированию сезонного льда над многолетним [7]. По данным Национального Центра обработки данных снега и льда в США (National Snow and Ice Data Center, далее NSIDC) к настоящему времени абсолютный минимум площади льда в СЛО составляет 3.41 млн.кв.км (сентябрь 2012г., http://nsidc.org), что на 49% ниже среднего значения за период с 1979 по 2000 гг. Лидирующая роль в этом процессе отводится атмосфере в связи с регистрируемым повышением приземной температуры воздуха в полярных широтах и преобладанием циркуляционного режима, формирующего устойчивый вынос льда за пределы Арктического бассейна. Влияние океана рассматривается как дополнительный фактор, приобретающий в последнее время немаловажное значение в связи с повышением температуры тихоокеанских и атлантических вод, поступающих в Арктический бассейн. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования, отражающие влияние океана на состояние морского льда СЛО в Атлантическом секторе Западной Арктики.

Метод исследования

Для проведения численных экспериментов используется трехмерная региональная численная модель СЛО и Северной Атлантики ИВМиМГ СО РАН [1,3,4,6]. Для определения потоков на поверхности океана и морского льда используются данные атмосферного реанализа CORE2 [9]. В ходе численного эксперимента моделируются изменения, происходящие в состоянии вод и морского льда, определяемые изменчивостью атмосферной циркуляции в период с 1948 по 2013 гг. Постановка эксперимента подробно описана в работе [1].

Результаты моделирования и данные наблюдений

Большая часть Западной Арктики (архипеллаг. Шпицберген, Баренцево и Карское моря) находится под влиянием Северной Атлантики. Теплая соленая вода, поступающая через Фареро-Шетландский пролив в Норвежское и Гренландское моря и далее в Баренцево море, и потоки теплого и влажного воздуха, распространяющегося над этой водой на восток и северо-восток в арктические моря и в Арктический бассейн, являются источником тепла для него.

Полученное в результате работы численной модели поле течений отражает основные потоки, определяющие обмен между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном [2]. Среди них две ветви атлантических вод, поступающих в СЛО и южный поток Восточно-Гренландского течения (рис. 1а). Восточная ветвь атлантических вод, проходящая через Баренцево море, теряет большую часть своего тепла вследствие интенсивного обмена с атмосферой, влияя на процессы образования льда. Модифицированная баренцевоморская атлантическая вода, в среднем имеющая отрицательную температуру, через желоб св. Анны выносится в котловину Нансена. Вторая ветвь атлантических вод – За-

падно - Шпицбергенское течение поступает в Арктический бассейн через пролив Фрама (далее Фрамовская ветвь). Перемешиваясь с холодной арктической водой, течение опускается на уровень промежуточных вод и следует дальше вдоль материкового склона. Теплое ядро атлантических вод в модельных расчетах в бассейне Нансена находится над материковым склоном на глубине 200–400 м. В соответствии с данными наблюдений [8], по мере продвижения вдоль материкового склона бассейна Нансена происходит интенсивная трансформация слоя атлантических вод.

Поступление в Арктический бассейн аномально теплых атлантических вод, начавшееся в конце 1980-х годов и продолжающееся по настоящее время, привело к повышению температуры слоя атлантических вод [7,8]. Это может отражаться на состоянии ледяного покрова за счет передачи тепла от атлантического слоя вышележащим слоям. Передача тепла от атлантических вод в атмосферу и в область морского льда в модели наиболее отчетливо проявляется в Баренцевом и Норвежском морях и в восточной части Гренландского моря (рис. 1б), где отсутствует лед даже в зимний период. Положение кромки льда отражает траекторию поступающих двух ветвей атлантических вод. Также заметно сокращение толщины льда вдоль материкового склона к северу от Баренцева моря, где теплые атлантические воды располагаются наиболее близко к поверхности, и процессы перемешивания способствуют вовлечению вод и передаче тепла вышележащим слоям.

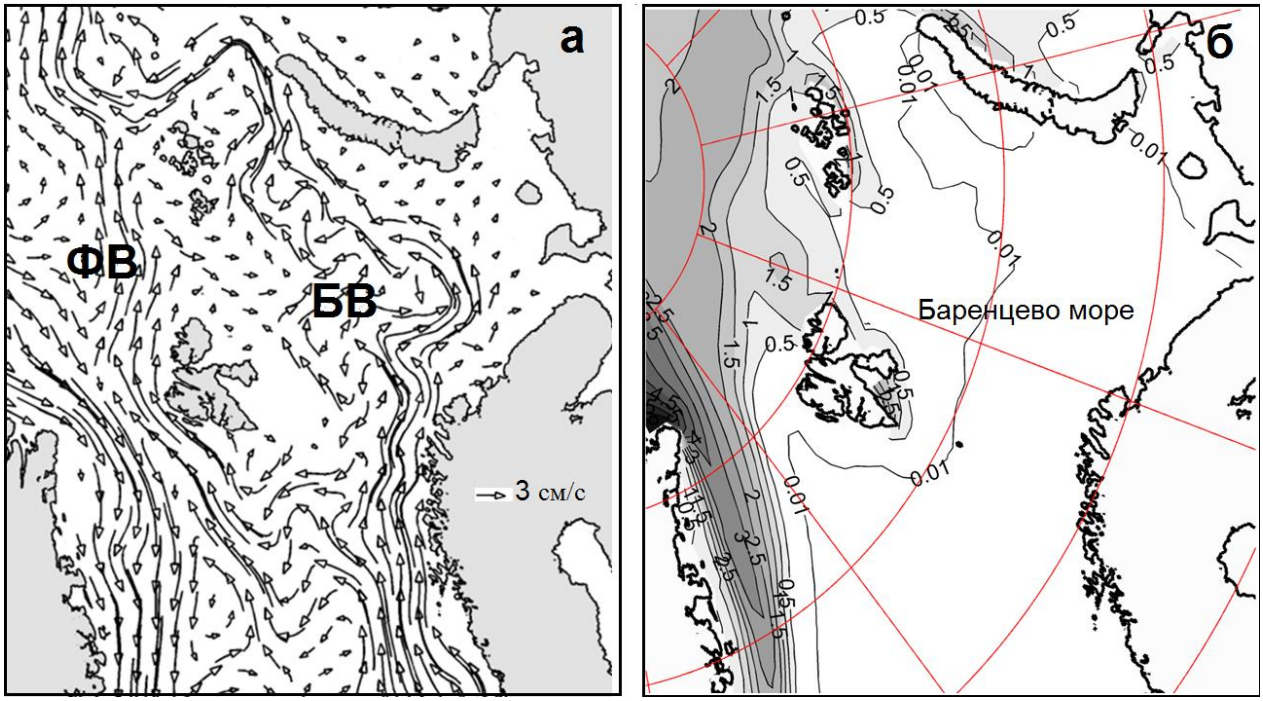


Рис. 1. Влияние атлантических вод на состояние морского льда СЛО в численном эксперименте:
а - поле модельных течений в слое 100-250м, демонстрирующее распространение атлантических вод (ФВ - Фрамовская ветвь, БВ - Баренцевоморская ветвь); б - толщина льда (м) в зимний период (февраль 2006 г.)

Влияние атлантических вод прослеживается к северу от Шпицбергена, где толщина льда в модельном расчете меняется от 1 до 50 см. Поле скорости таяния на нижней поверхности льда в зимний период показывает ненулевые значения в этой области и на кромке льда в Гренландском море (рис. 2б), несмотря на то, что поле дрейфа льда отражает поток, выносящий лед из Арктики. В некоторые годы (2006 г.) рассчитанная здесь скорость таяния льда на нижней поверхности льда в зимний период больше, чем в летний (рис. 2а).

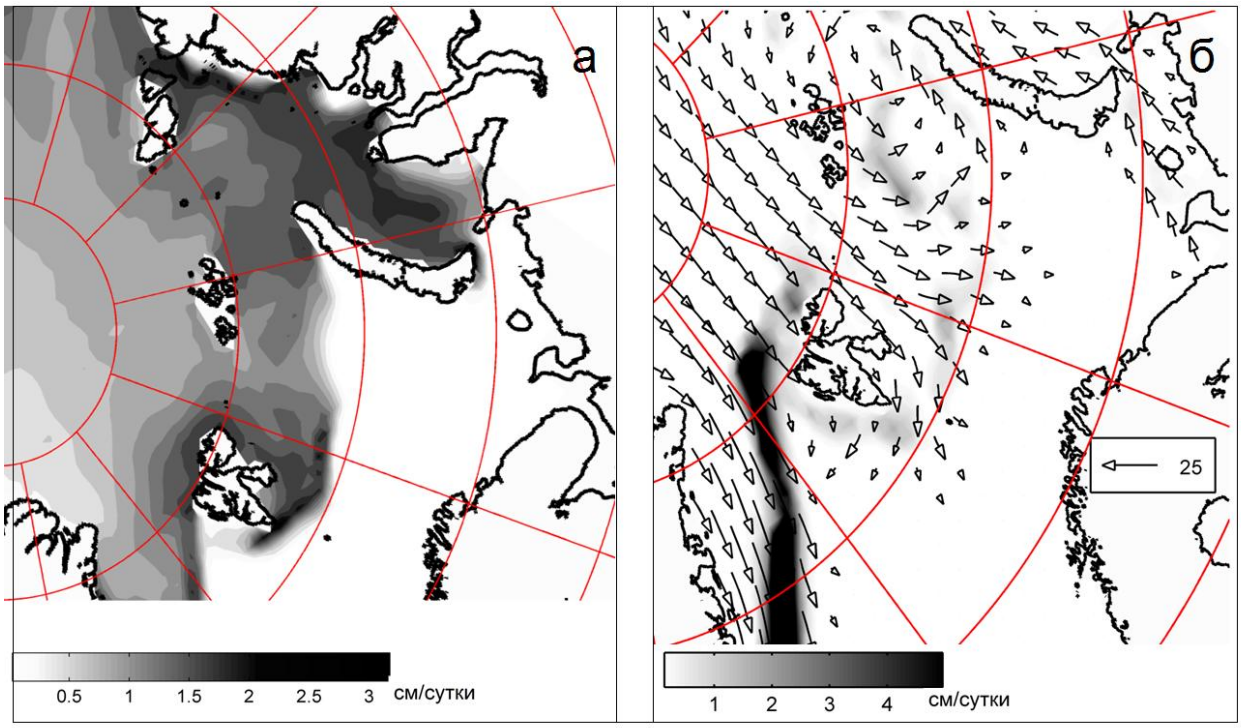


Рис. 2. Скорость таяния на нижней поверхности льда
в численном эксперименте: а - июль 2006, б - февраль

Перенос тепла от ядра атлантических вод в вышележащий слой вдоль материкового склона Евразии подтверждается данными наблюдений и модельными расчетами [7]. На основе анализа данных наблюдений и результатов расчетов толщины однолетнего льда вклад теплового воздействия атлантических вод в сокращение средней толщины льда в западной части котловины Нансена в период с 2004 по 2008 гг. оценивается в 20% [5].

Заключение

В настоящее время наблюдается процесс резкого сокращения площади ледяного покрова СЛО. Роль океана в этом процессе до конца не выяснена. Данные наблюдений и результаты расчетов показывают, что в приатлантическом секторе СЛО, где положение кромки льда отражает траекторию поступающих двух ветвей атлантических вод, тепловое влияние океана несомненно. Учитывая, что процесс повышения температуры поступающих атлантических вод продолжается более двух десятилетий, необходим тщательный подход к изуче-

нию физических механизмов, определяющих изменчивость СЛО, и его влияния на состояние морского льда.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 13-05-00480, № 14-05-00730), Минобрнауки России (ПНИЭР RFMEFI61014X0006).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948-2007 гг. // Известия РАН. Серия ФАО. 2009. т.Т. 45. N 1. С. 145-160.

2. Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. // Л: Гидрометеоиздат. 1980. 270 с.

3. Платов Г. А. Численное моделирование формирования глубинных вод Северного Ледовитого океана. Часть II: Результаты региональных и глобальных расчетов // Известия РАН. Серия ФАО. 2011. т. 47. № 3. с. 409–425.

4. Golubeva, E. N., and G. A. Platov. On improving the simulation of Atlantic water circulation in the Arctic Ocean. // J. Geophys. Res. 2007. 112. doi:10.1029/2006JC003734.

5. Ivanov, V. V., Alexeev, V. A., Repina, I., Koldunov, N. V. and Smirnov, A. Tracing Atlantic Water signature in the Arctic sea ice cover east of Svalbard. // Advances in Meteorology. 2012. p.1- 11. doi:10.1155/2012/201818.

6. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // J. Phys. Oceanogr. 1997. V. 27. № 9. P. 1849-1867.

7. Polyakov, I. V., Timokhov, L. A., Alexeev, V. A., Bacon, S., Dmitrenko, I. A., Fortier, L.,Frolov, I. E., Gascard, J. C., 5 Hansen, E., Ivanov, V. V., Laxon, S., Mauritzen, C., Perovich,D., Shimada, K., Simmons, H. L., Sokolov, V. T., Steele, M., and Toole, J. Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap // J. Phys. Oceanogr. 2010. 40. P. 2743–2756. doi::10.1175/2010JPO4339.1.

8. Rudels B., U. Schauer, G. Björk, M. Korhonen, S. Pisarev, B. Rabe, and A. Wisotzki: Observations of water masses and circulation with focus on the Eurasian Basin of the Arctic Ocean from the 1990s to the late 2000s // Ocean Sci. 9. P.147–169. doi:10.5194/os-9-147-2013.

9. http://data1.gfdl.noaa.gov/nomads/forms/mom4/COREv2.html Version 2 forcing for coordinated ocean-ice reference experiments (core).

© Е. Н. Голубева, Г. А. Платов, Д. Ф. Якшина, 2015

УДК 51.74

АПОСТЕРИОРНЫЕ АЛГОРИТМЫ В ГЕОФИЗИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

Гюльнара Маратовна Воскобойникова
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, ассистент, тел. (383)330-87-43, e-mail: gulya@opg.sscc.ru

Марат Саматович Хайретдинов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, профессор, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru;

Предложен и исследуется новый подход для решения проблемы активного геофизического мониторинга природной среды. В основе его лежит решение задачи обнаружения и выделения волновых форм, порождаемых в земле и приземной атмосфере рассматриваемыми событиями. Решение осуществляется в едином процессе дискретной оптимизации. Эффективность подхода иллюстрируется на ряде численных экспериментов.

Ключевые слова: геофизический мониторинг, обратные задачи, апостериорные алгоритмы.

POSTERIORI ALGORITHMS IN THE PROBLEM OF GEOPHYSICAL MONITORING.

Gyulnara M. Voskoboynikova
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Ph. D., Researcher; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karla Marksa Ave, Assistan, tel. (383)330-87-43, e-mail: gulya@opg.sscc.ru

Marat S. Khairetdinov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Ph. D., Senior Researcher; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karla Marksa Ave, Prof., tel. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru

A new approach to solving the problem of active geophysical monitoring of the natural environment is proposed and investigated. It is based on the detection and separation of waveforms generated in the Earth and surface atmosphere by the above events. The solution is obtained by a unifying process of discrete optimization. The efficiency of this approach is illustrated by some numerical experiments.

Key words: Geophysical monitoring, inverse problems, posteriori algorithms.

Проблемы мониторинга, прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций во многом связаны с геофизическим мониторингом природных и техногенных событий, а также предшествующих им геодинамических процессов. Мониторинг базируется на ряде последовательных этапов, включающих в себя удаленную регистрацию откликов событий, измерение их основных параметров

в виде времен пробега сейсмических волн либо же в виде исходных волновых форм. На конечном этапе решаются обратные задачи, связанные с определением географического положения и времени регистрации события. В данной работе предложен новый подход, обеспечивающий в сравнении с известными методами статистической обработки данных более высокую точность измерений времен прихода волн и выделения их форм одновременно. Предлагаемый подход основан на применении апостериорных алгоритмов дискретной оптимизации. Приводятся результаты численных экспериментов по оцениванию точности и помехоустойчивости алгоритмов.

Задача оценивания неизвестных параметров события сводится к решению нелинейной системы уравнений:

$$\hat{\eta} = \eta(\gamma, \theta) + \varepsilon \qquad (1)$$

где $\hat{\eta} = (\hat{n}_1, ..., \hat{n}_N)^T$ – вектор измеренных времен пробега сейсмических волн, $\eta(\gamma, \theta) = (n_1, ..., n_M)^T$ – N-мерный вектор вычисляемых времен пробега (теоретический годограф), $\varepsilon = (\varepsilon_1, ..., \varepsilon_N)^T$ – вектор невязок, $\vec{\theta} = (x, y, z, v, t)^T$ – m-мерный вектор оцениваемых параметров, $\gamma = (\gamma_1, ..., \gamma_N)$ – матрица координат датчиков, N – число датчиков. В качестве оцениваемых параметров выступают пространственные координаты источника – x, y, z, скоростная характеристика среды v и время в источнике t. Решение уравнения (1) сводится к решению обратной задачи. При этом точность решения складывается из ошибок оценивания вектора времен $\hat{\eta}$, невязок $\varepsilon=(\varepsilon_1, ..., \varepsilon_N)^T$, выбора геометрии расстановки датчиков на дневной поверхности Земли. Выделены следующие основные этапы решения поставленной задачи: 1) обнаружение волн на фоне внешних шумов и измерение их времен пробега и восстановление волновых форм; 2) решение обратной задачи по расчету параметров событий по данным измерений.

На сегодня существуют ряд алгоритмов последовательного типа [1,2,3,4], позволяющих определять времена прихода волн по мере поступления данных (on-line). Последовательный подход ориентирован на получение «быстрого» на текущий момент, но в общем случае не оптимального решения задачи. Наряду с последовательными существуют апостериорные алгоритмы (off-line), которые в отличие от первых ориентированы на получение оптимального (по всем накопленным данным) решения. Этот подход потенциально более точен, чем последовательный. Однако его алгоритмическая реализация сопряжена с решением трудоемких в вычислительном плане задач дискретной оптимизации. В настоящей работе излагается слабоизученный применительно к геофизическому мониторингу подход, в рамках которого решение задачи находится в едином процессе дискретной оптимизации без разбиения задачи на этапы. Необходимо оценить непосредственно времена прихода волн либо получить одновременно оценки времен прихода и формы волновых импульсов. Среди этих алгоритмов будем рассматривать алгоритмы, предназначенные для обработки последовательностей, изменяющих свои свойства *квазипериодически* [5,6]. Это означает, что временной интервал между двумя последовательными импульсами ограничен сверху и снизу заданными константами.

Теоретическое обоснование рассматриваемого класса алгоритмов дано в [7]. Ниже приводятся результаты численного моделирования предложенных алгоритмов для различных волновых форм, одинаковых по форме и длительности, осложненных гауссовым шумом различного уровня. Задавались образцы реальных волновых форм, которые ранее были зарегистрированы от взрывных и вибрационных источников, и различные соотношения сигнал/шум. По сгенерированному набору ($n_1,...,n_M$) случайных номеров формировалась последовательность компонент вектора отсчетов волновых форм X. В соответствии с принятой моделью анализируемая последовательность компонент вектора Y синтезировалась как сумма вектора X и гауссова вектора E с параметрами распределения $(0, \sigma^2 I)$. В качестве примера на рис.1 приведены в графическом виде результаты совместного обнаружения и выделения волновых форм. На рисунке изображены: a) сгенерированная модельная зашумленная последовательность и последовательность, найденная алгоритмом дискретной оптимизации по определению вектора измеренных времен пробега сейсмических волн $\hat{\eta} = (\hat{n}_1,...,\hat{n}_N)^T$ и оценок их волновых форм;

b) результаты численного оценивания погрешностей выделения одинаковых волновых форм в квазипериодической последовательности на фоне шума для случая отношенич сигнал/шум=1.25. Представленные в подрисуночном тексте параметры q, $T_{\min}$ и $T_{\max}$ соответствуют длительности волновой формы и границам снизу и сверху на интервал между двумя последовательными волновыми формами Времена вступлений для всех выделенных импульсов по отношению к обеим последовательностям проставлены на оси абсцисс вначале каждого из импульсов. В серии численных экспериментов показано, что средняя абсолютная погрешность оценивания времени вступления волновой формы составляет 0,047 сек, что в 3 раза меньше, чем у алгоритма вейвлет-фильтрации с пороговым обнаружителем, использованного для решения этой же задачи [6,7]. Для проверки качества алгоритма оценивания волновых форм использовалось среднеквадратическое уклонение $\delta_U(M) = 1/q \cdot \sum_{k=0}^{q-1}(u_k - \hat{u}_k)^2$, где u_k, $\hat{u}_k$, k=0,...,q-1 – заданные и вычисленные компоненты единичной волновой формы U. Относительная среднеквадратическая погрешность оценивания волновой формы для данных рис. 1 не превышает 6 %.

В рассматриваемых алгоритмах параметры q, $T_{\min}$ и $T_{\max}$, являются входными данными, которые в практических задачах зачастую оказываются неизвестны заранее. Для устранения этой априорной неопределенности авторами предложен подход для предварительного оценивания указанных параметров, основанный на фрактальном представлении волновых форм. Подход опирается на отображении волновых форм на двумерную плоскость "частота-время" с применением двумерного преобразования Фурье вида

$$F(k_1,k_2) = \frac{1}{\sqrt{N_1 N_2}} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} F[n_1,n_2] \cdot w_{N_1}^{k_1 n_1} w_{N_2}^{k_2 n_2}, \; w_N = \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}\right) \qquad (2)$$

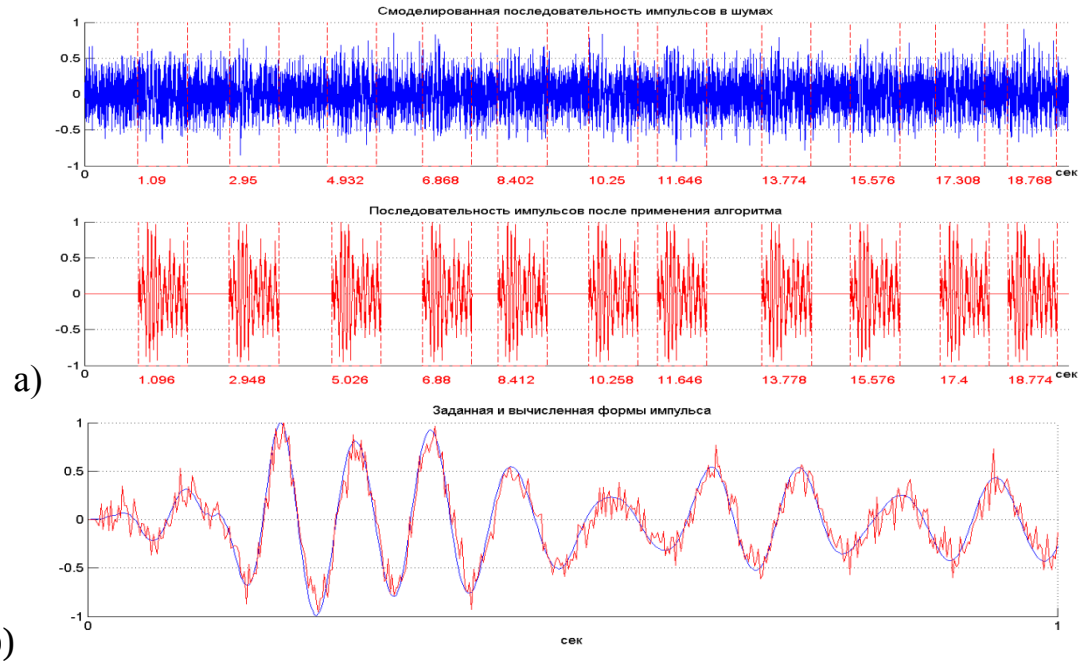


Рис. 1. Сигнал/шум=1.25, T_{min}=1.3с, T_{max}=2.2с, q=1с; N=20с, M=11

Получаемые таким образом изображения волновых форм служат для предварительного оценивания границ волновых импульсов. Последующее уточненное вычисление реализуется с помощью алгоритма дискретной оптимизации путем решения задачи 3. Ниже приводятся результаты численного моделирования фрактального подхода к выделению границ волновых форм (рис. 2). Задавались образцы волновых форм, взятых из экспериментов. На выбранные образцы накладывались шумы с гауссовым распределением с параметрами (0, σ). Выбором σ задавалось соотношение сигнал/шум.

Роль фрактального представления иллюстрируется с помощью рис. 2. На рис. 2б изображены зашумленные последовательности волновых форм, подлежащие обработке. Запись содержит 11 волновых форм, вырезанных из реальных сейсмограмм, которые зарегистрированы от взрывных и вибрационных источников. На рис. 2а представлен результат двумерного Фурье − отображения записи согласно (2). Здесь хорошо выделяются из шумов начала и концы волновых форм, включая начало квазипериодической последовательности. В нижней части рис. 2б представлены последовательности волновых форм с указанием найденных времен вступлений, ниже на рис. 2с представлены в виде гистограмм погрешности вычисления времен вступлений для вариантов вычислений без использования фрактального представления (2) – черные столбики, и с использованием – светлые столбики. Прямоугольными рамками на записях рис. 2б очерчены места расположения волновых форм – исходных и вычисленных с применением фрактального подхода. Как следует из рис. 2с использование фрактального представления последовательности импульсов позволяет существенно повысить точность и надежность определения времен вступлений алгоритмом дискретной оптимизации. В ряде случаев наблюдается уменьшение погрешности на порядок [7].

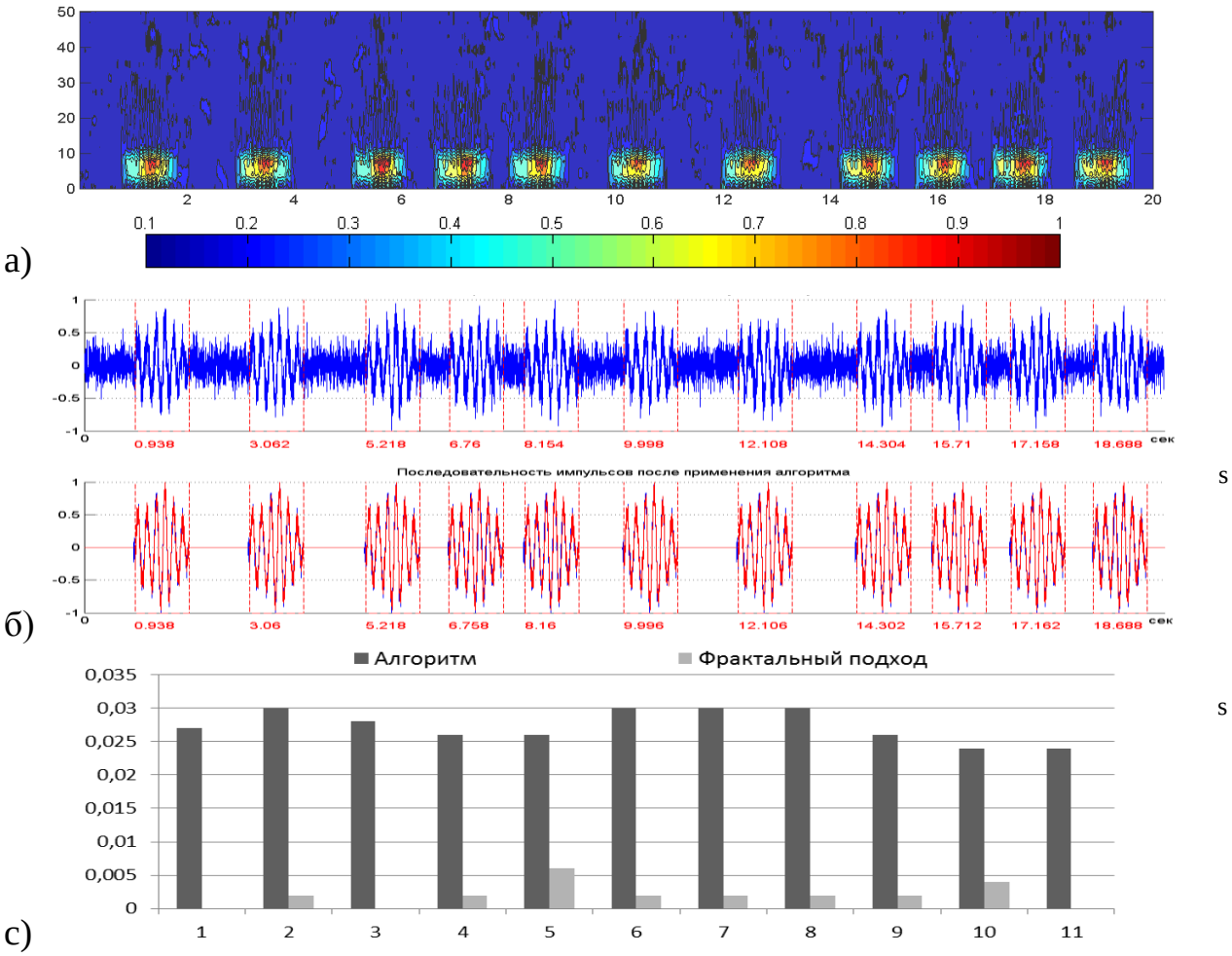


Рис. 2. Сигнал/шум=1.25, T_{min}=1.3с, T_{max}=2.2с, q=1с; N=20с, M=11

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-07-00518.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Detection of Abrupt Changes in Signals and Dynamical Systems. Edited by M. Basseville and A. Benveniste, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, p.278, 1986.

2. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М.: Наука, 1983.

3. Hairetdinov M.S., Voskoboynikova G.M., Sedukhina G.F. Information Technology for Seismic Location of Impulsive Sources. Research and technology review National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (NNC RK Bulletin), iss.3(43), 2010, p.p. 32-39.

4. Khairetdinov M.S., Avrorov S.A., Livenets A.A. Computing technology in seismic monitoring networks and systems. Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Mathematical Modeling in Geophysics, iss.:13 (2010), p.p.51-69.

5. Kel'manov A.V., Jeon B. A posteriori joint detection and discrimination of pulses in a quasiperiodic pulse train // IEEE Trans. Signal Processing. 2004. V. 52, N 3. P. 1–12.

6. Woskoboynikova G.M. Determination of the arrival times of the seismic by the dynamic programming method // Proceedings of 9th Korean-Russian International Symposium on "Science & Technology" (KORUS 2005). – Novosibirsk: NSTU, 2005. – P. 734-737.

7. Воскобойникова Г.М. Автореферат диссертации «Апостериорные вычислительные алгоритмы и программы в задачах геофизического мониторинга», Новосибирск, 2014.

© Г. М. Воскобойникова, М .С. Хайретдинов, 2015

УДК:551.1:631.4

МОНИТОРИНГ ПРИЗЕМНЫХ СЛОЕВ ВОЗДУХА И ПОЧВЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ ПОГОДЫ

Лариса Викторовна Воронина
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат географических наук, доцент кафедры управления и предпринимательства, старший научный сотрудник, тел. (383)361-01-24, e-mail: voroninasgga@mail.ru

Приводятся результаты полевых наблюдений за температурой воздуха и почвы при разных типах погоды. Предлагается классификация типов погоды как необходимый ресурс получения климатических различий.

Ключевые слова: климат, циркуляция воздушных масс, рельеф, природно-климатические зоны, типы погоды, температуры воздуха и почвы, чернозём, метеорологические наблюдения.

MONITORING SURFACE LAYERS OF AIR AND SOIL LAYERS WITH DIFFERENT TYPES OF WEATHER

Larisa V. Voronina
Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associate Professor, Department of Management and Entrepreneurship, Senior Research Fellow, tel. (383)361-01-24, e-mail: voroninasgga@mail.ru

The results of field measurements of temperature of air and soil in different types of weather. The classification of types of weather as a necessary resource obtaining climatic differences.

Key words: climate, circulation of air masses, topography, climatic zones, types of weather, temperature, air and soil, black soil, meteorological observations.

Закономерное сочетание тепла и влаги в приземных слоях воздуха и в верхних горизонтах почвенного покрова приводят к необходимости проведения качественного мониторинга тепловых и влажностных процессов в этих сферах. Различные типы зональных природно-климатических комплексов Новосибирской области – ландшафтные типы климатов леса, лесостепи и степи – по-разному проявляются не только в связи с многокрасочным различием природно-территориальных комплексов, но и с неадекватным их состоянием при разных типах погоды. В период полевых микроклиматических наблюдений на разных ландшафтах и в разных природно-климатических зонах Новосибирской области нами были отмечены подобные закономерности в изменении тепла и влаги при разных типах погоды [1].

Погода отдельных лет зависит от типа атмосферной циркуляции и солнечной радиации. Например, при устойчивом западном переносе над котловинной левобережной частью области развивается волновая деформация воздушных потоков. В центральной части котловины происходят процессы опускания

верхних слоев воздуха. При этом на отдельные типы погоды могут оказывать влияние такие элементы рельефа, как возвышенное Приишимье, Казахский мелкосопочник или даже Прииртышские увалы. Именно они способствуют деформации воздушных масс, иссушению воздуха в летние месяцы, либо охлаждению его – в зимние.

При тех же циркуляционных процессах в восточной части области – в её Правобережье – при подъёме воздуха по склонам Барабинской котловины в Приобье суховейная погода сменяется дождливой. Бывают случаи, когда происходит адвекция холодного и сырого воздуха с территории обширных Васюганских болот, и тогда устанавливается прохладная осенняя ненастная погода с моросящими дождями, туманами, заморозками. Однако чаще бывают годы с ясной теплой либо жаркой погодой и с благоприятным водным балансом.

Таким образом, одним из структурных типов ландшафтно-климатических отличий тепла и влаги является геоморфологический, когда играют роль особенности рельефа не столько области как таковой, но южных равнин Западной Сибири [2] и более отдалённых территорий. Немаловажное значение имеют и почвенно-растительные покровы с их неодинаковой степенью увлажнения подстилающей поверхности, разной покрытостью травяным покровом и т.д.

Погодные колебания отмечались на протяжении всего периода метеонаблюдений, но с начала нового тысячелетия наблюдаются особо резкие перепады и в давлении и в температуре воздуха и в осадках, что стабильно регистрируется мониторингом приземных слоёв воздуха и почвенного покрова [3,4,5]. К примеру, погодные флуктуации могли достигать таких контрастов, когда в один день температура воздуха поднималась до 33°С, а уже на вторые сутки резко падала до 8 -10°С (первое и второе сентября 2010 года).

Всё это приводит к необходимости мониторинга за погодным режимом и особенностями микроклимата. За погодой ведутся наблюдения на метеостанциях, которые равномерно расположены по всей территории Новосибирской области и составляют единое целое с общей системой глобальной метеосети. Метеорологическая сеть – совокупность метеорологических станций и постов, ведущих наблюдения по единой программе и в строго установленные сроки для изучения погоды, климата и решения других прикладных и научных задач.

В каждой стране основная метеосеть входит в состав государственной метеослужбы (в России – в состав Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды). Все наблюдения проводятся по специальным общепринятым методикам в чётко установленные сроки по единым приборам – в Новосибирской области, в России и во всех странах мира. Существует множество методических указаний по расположению метеостанций, по их структуре, по установке приборов, по поведению метеонаблюдателя на метеоплощадке и т.д. Это абсолютно четкая и сложная система, которая принята во всех странах, а сама работа метеоролога в любых его ипостасях – начиная от скромного наблюдателя и заканчивая крупным учёным – требует исключительной кропотливости и терпения, тщательности и точности в работе [6]. К этому

следует добавить, что везде и всегда метеонаблюдения проводятся круглосуточно через каждые 3 часа – 8 раз в сутки в течение 10-минутного периода.

Но неодинаковость погодных режимов усложняет задачу выявления тех или иных закономерностей в ходе тепла и влаги. В связи с этим разнообразие типов погод в периоды наших полевых наблюдений были объединены нами в несколько типов: теплый хорошо увлажненный год, относительно теплый относительно хорошо увлажненный, относительно теплый недостаточно увлажненный, холодный недостаточно увлажненный, холодный хорошо увлажненный.

Температурный режим почв, как и приземных слов воздуха, зависят не только от элементов рельефа или разного гранулометрического состава почв, но, в значительной степени – от погодных условий. В Новосибирской области она бывает еще более контрастной из-за высокой повторяемости погод разного типа.

Приведём некоторые примеры.

1. Положение чернозёмов на повышенных элементах рельефа, хорошая обдуваемость их поверхности и увеличение затрат тепла на испарение в мае приводят к тому, что приходная часть радиационного баланса (R) меньше в увлажненные годы с частой фронтальной деятельностью, чем в другие годы, а это сказывается на степени их прогреваемости. В итоге наблюдается различная продолжительность температур выше 5, 10, 15 и 20°С в годы с разным метеорежимом (табл.).

Таблица

Продолжительность положительных температур (в днях) на чернозёме выщелоченном в южной лесостепи при разных типах погодного режима

Метеорологический тип года	Продолжительность температур в почве выше 5,10, 15 и 20 °С			
	5	10	15	20
Теплый хорошо увлажненный	145	114	94	42
Относительно теплый относительно хорошо увлажненный	152	104	65	11
Относительно теплый недостаточно увлажненный	152	114	75	-
Холодный очень хорошо увлажненный	130	115	50	-
Холодный недостаточно увлажненный	136	76	33	-

Из содержания таблицы прослеживается, что в тёплый хорошо увлажнённый год положительные температуры сохраняются в пахотном слое почвы от 42 до 145 дней, в годы относительно тёплые относительно хорошо увлажнённые длительность температур выше 5°С возрастает, а всех остальных сумм температур (выше 10, 15 и 20°С) – уменьшается. Минимальных значений продолжительность температур выше всех положительных пределов достигает в годы холодные недостаточно увлажнённые. Как видно из представленного материала, большую роль играет погодный режим, и проведенная нами классификация летних периодов по типам этого режима очень наглядно отражает экологическую степень большей или меньшей комфортности теплового режима

в почвенном профиле, что важно и для сельскохозяйственных культур, и для естественной растительности, и для животного мира.

2.Одним из факторов климата и микроклимата почв является напряжение солнечной радиации. Полевые исследования, проведённые на стационарах разных природно-климатических зон Новосибирской области, позволяют получить материалы, характеризующие приток солнечной энергии в разные по метеоусловиям годы [1]. Например, в очень тёплый сухой год в среднем за сутки R выше на почвах, расположенных в понижениях, т.е. на торфяно-болотных почвах он выше, чем на солонцах, а на солонцах – выше, чем на чернозёмах. Это объясняется меньшим отражением радиации с влажной поверхности, и в очень тёплые сухие годы эти различия возрастают.

В годы же и периоды увлажнённые картина меняется на противоположную: значения и соотношение отражённой радиации на разных типах почв изменяются, и в итоге R выше на почвах чернозёмного ряда, ниже – на солонцах, и самый низкий на почвах заболоченных типов. Более того, погодичные отклонения R сопровождаются колебаниями температур, различной интенсивностью прогревания профиля почв, неодинаковой продолжительностью положительных температур.

3. Почвенно-экологические условия, изменяясь от зоны к зоне, весьма существенно различаются в пределах так же одной зоны, но при разных типах погоды. Сезонное прогревание автоморфных почв в южной лесостепи глубже и продолжительнее, чем на более северных комплексах той же зоны. И чем южнее по региону, тем лучше прогревается почва и тем сильнее в конечном итоге от данной почвы отдача тепла, причём усиливается этот процесс в жаркие сухие годы. При этом суммы температур выше 10°С в пахотном слое на 300-400°С превышают таковые в более северных почвенных комплексах, а в жаркие сухие годы эта разница ещё более возрастает, что ставит серьёзные задачи проведения более точного мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронина Л.В.Тепловой режим почв солонцовых комплексов // Новосибирск: Наука, 1992.– 144 с.

2. Николаев В.А., Мизеров Б.В., Белецкая Н.П., Гриценко А.Г. Рельеф южных равнин Западной Сибири // Закономерности развития рельефа Северной Азии. Новосибирск: Тр. ИГиГ СО АН СССР.1982. Вып. 497. С 15 – 37.

3. Наумцева А. Знойный февраль [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http: // news. ngs. ru /more/2064312/ (дата обращения: 10.02.2015).

4. За неделю выпала месячная норма снега [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://news.ngs.ru/more/2081842/ (дата обращения: 02.03.2015).

5. Ягудин Р.А. И где же крещенские морозы? [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://meteo-nso.ru/articles/more/66 (дата обращения: 21.01.2015).

6. Воронина Л. В. В один и тот же час по всему белу свету// Советская Сибирь. – 1 992. – № 185. – С. 3.

© Л. В. Воронина, 2015

УДК 550.34

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ЛОКАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ МАЛОЙ ПОДЗЕМНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППОЙ

Андрей Сергеевич Белоносов
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-42, e-mail: white@sscc.ru

Валерий Викторович Ковалевский
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, тел. (383)330-71-96, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Анастасия Глебовна Максимова
Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студентка 3-го курса ММФ, e-mail: maksi-nastya@yandex.ru

Анастасия Андреевна Галактионова
Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студентка 3-го курса ММФ, e-mail: galakt95@mail.ru

Игорь Игоревич Тагильцев
Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент 3-го курса ММФ, e-mail: gannitgl@gmail.com

В работе изучается возможность применения поляризационного анализа для повышения надежности локации очагов микросейсмической эмиссии по данным мониторинга сейсмической группой из 6 трехкомпонентных сейсморегистраторов с площадной апертурой 2,5 км на 0,5 км, развернутой в штольне БНО ИЯИ РАН в Приэльбрусье.

Ключевые слова: подземная сейсмическая группа, поляризационный анализ трехкомпонентных сейсмических записей, локация сейсмических событий.

POLARIZATION ANALYSIS APPLICATION FOR SEISMIC EVENTS LOCATION BY SMALL UNDERGROUND SEISMIC ARRAY

Andrey S. Belonosov
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-87-42, e-mail: white@sscc.ru

Valery V. Kovalevsky
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentiev Ave, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director, tel. (383)330-70-69, e-mail: kovalevsky@sscc.ru

Anastasia G. Maksimova
Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., third-year student of Mechanics and Mathematics Department, e-mail: maksi-nastya@yandex.ru

Anastasia A. Galaktionova
Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., third-year student of Mechanics and Mathematics Department, e-mail: galakt95@mail.ru

Igor I. Tagiltsev
Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., third-year student of Mechanics and Mathematics Department, e-mail: gannitgl@gmail.com

The feasibility of using polarization analysis for improving reliability of the microseismic emission's source location based on the monitoring data of underground seismic array of 6 three component seismic recorders with areal aperture 2.5 km by 0.5 km, deployed in a tunnel BNO INR in Elbrus region is considered in this work.

Key words: underground seismic group, polarization analysis of three-component array data, seismic events location.

В районе Эльбрусского вулканического центра регистрируются слабые локальные сейсмические события, порождаемые геодинамическими процессами и вулканической активностью области вулкана, включая окружающие его разломные зоны. В этой связи, интерес представляет возможность разработки надежных алгоритмов локации очагов сейсмоакустической эмиссии по данным полевых измерений с использованием сейсмической антенны из нескольких трехкомпонентных (3С) датчиков, располагаемой в штольне Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) в Приэльбрусье [1], [2].

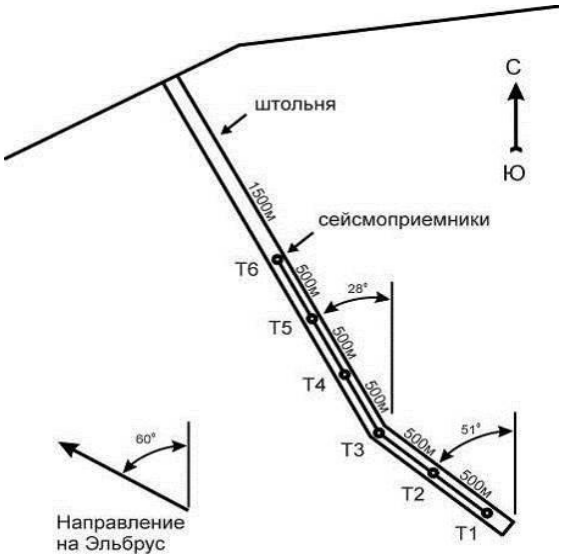


Рис. 1. Схема расположения сейсмоприемников сейсмической группы в штольне БНО ИЯИ РАН в плане

Использование такой антенны привлекательно в том плане, что она располагается внутри цельного скального массива, что обеспечивает низкий уровень техногенного шума и позволяет надежно регистрировать очень слабые локальные сейсмические события. Однако применение стандартных подходов, основанных на решении обратной кинематической задачи по относительным време-

нам вступлений продольных и поперечных волн, в данном случае накладывает существенные ограничения на точность и однозначность определения истинного положения источника сейсмического события: ввиду почти линейной геометрии сейсмической антенны, обратная кинематическая задача не имеет единственного решения. Это проявляется в наличии ложной симметричной области возможного положения источника [3–5].

В работе изучается возможность применения поляризационного анализа данных 3С наблюдений, который позволяет определить направление прихода волны. Поскольку регистрация производится внутри цельного горного массива, это направление оправданно можно считать направлением на источник. Имея направления от двух и более «разнесенных» 3С датчиков, в пространстве четко выделяется зона «пересечения» этих направлений, что позволяет исключить упомянутую ложную симметричную область.

В скользящем временном окне, размеры которого выбираются в зависимости от длины волны, по трехкомпонентным записям вычисляется амплитуда главной компоненты смещения частицы в волне. Мы рассматриваем трехкомпонентную случайную величину, которая имеет свои реализации для каждого момента t в выбранном окне. Собственные числа и вектора ковариационной матрицы полностью характеризуют величину и направленность осей мгновенного эллипсоида в момент времени t.

На рис. 2 приведен результат применения поляризационного анализа к фрагменту 3С записи для сейсмоприемника Т6. Этому фрагменту отвечает сейсмическое событие, проиллюстрированное на рис. 3. X, Y, Z – компоненты записи, Pr – проекция 3С трассы на главное направление, teta, phi – полярный и азимутальный углы вектора главного направления, Ell – график «эллиптичности», определяемой по формуле:

$$\mathrm{Ell} = 1 - \left(\frac{\lambda_2 + \lambda_3}{2\lambda_1}\right)^n,$$

где λ_1, λ_2, λ_3 – собственные значения ковариационной матрицы, расположенные в порядке убывания.

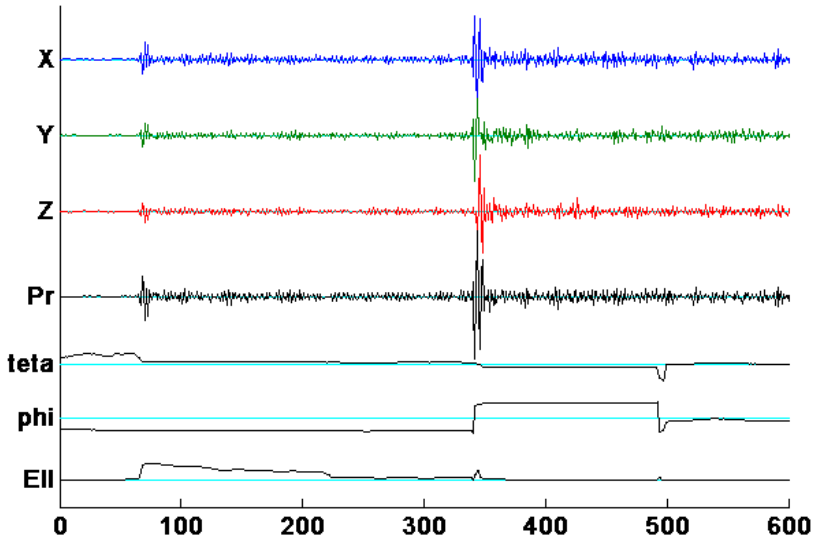


Рис. 2. Результат применения поляризационного анализа

Из рис. 3 видно, что источник сейсмического события располагается на дневной поверхности, а расстояние до него определено неверно из-за существенно завышенной оценки скоростей P/S волн. Скорее всего, это событие произошло в районе Баксанского ущелья, где располагается область пересечения пучков лучей, отвечающих главным направлениям для датчиков T2, T6.

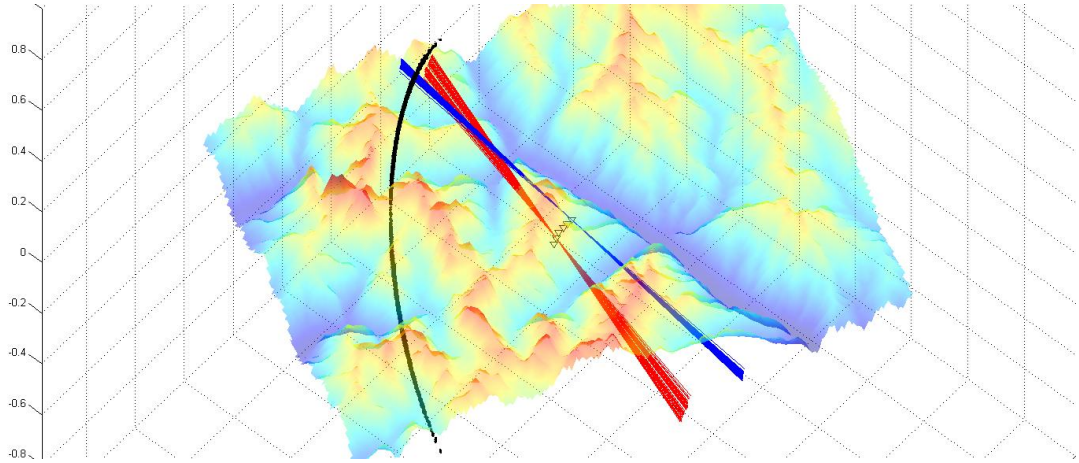


Рис. 3. Пространственная локализация сейсмического события на расстоянии 10,2 км, зарегистрированного подземной сейсмической группой, с использованием кинематических характеристик – относительных времен вступлений (зачерненная дугообразная область), и поляризационного анализа (пересекающиеся пучки лучей)

Рис. 4 относится к другому событию, которое по кинематическим характеристикам произошло предположительно на расстоянии 2,7 км от центра группы. Поляризационный анализ позволяет заключить, что источник этого события располагается на глубине внутри горного массива. Результат решения обратной кинематической задачи здесь также показывает, что значения скоростей P/S волн несколько завышены.

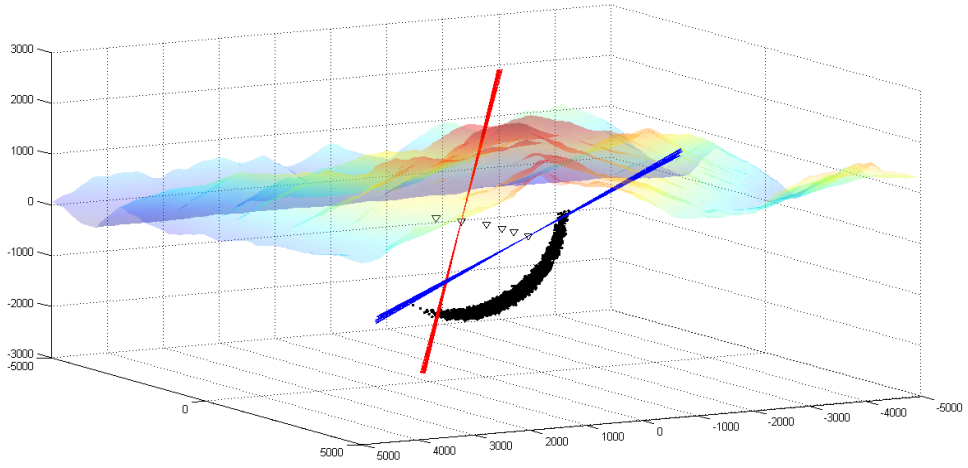


Рис. 4. Пространственная локализация сейсмического события на расстоянии 2,7 км

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-07-06821-а, № 14-07-00832, а также Новосибирского государственного университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Собисевич А. Л., Гриднев Д. Г., Собисевич Л. Е., Канониди К. Х. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44, № 1. С. 21–42.

2. Ковалевский В. В. О характеристиках подземной сейсмической группы в Приэльбрусье // Вестник НЯЦ РК – 2013. – № 2. – С. 18–23.

3. Ковалевский В. В., Белоносов А. С. Исследование параметров локализации сейсмических событий подземной сейсмической группой в Приэльбрусье // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 202–206.

4. Ковалевский В. В., Белоносов А. С., Авроров С. А., Якименко А. А. Локализация сейсмических событий в Приэльбрусье подземной сейсмической группой // Периодический Научно-технический журнал Национального ядерного центра республики Казахстан. Вестник НЯЦ РК - Курчатов, Казахстан - 2014 - Вып. 2 - С. 123–128.

5. Ковалевский В. В., Белоносов А. С. Экспериментальные работы с подземной сейсмической группой в Приэльбрусье. // Геофизические методы исследования земной коры: Матер. Всерос. конф., посв. 100-летию со дня рожд. ак. Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г) // СО РАН, ИНГГФ им А.А. Трофимука. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, стр. 161-165.

© А. С. Белоносов, В. В. Ковалевский, А. Г. Максимова, А. А. Галактионова, И. И. Тагильцев, 2015

УДК 550.34

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СИСТЕМАТИЗАЦИИ КОНТЕНТА ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСА «АКТИВНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ»

Людмила Петровна Брагинская
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий программист, тел. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sscc.ru

Андрей Павлович Григорюк
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sscc.ru

Юрий Алексеевич Загорулько
Институт систем информатики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)332-83-59, e-mail: zagor@iis.nsk.su

Олеся Игнатьевна Боровикова
Институт систем информатики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)330-79-91, e-mail: olesya@iis.nsk.su

В работе рассмотрена методологическая основа систематизации контента тематического интернет-ресурса «Активная сейсмология» на основе онтологии предметной области. Предложенный метод позволяет обеспечить единообразное преставление знаний и данных, а также их семантическую связность.

Ключевые слова: сейсмология, онтология, вычислительные информационные системы, базы данных.

INTEGRATION OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE IN ACTIVE SEISMOLOGY

Ludmila P. Braginskaya
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Lead Programmer, tel. (383)330-70-69, e-mail: ludmila@opg.sscc.ru,

Andrey P. Grigoruk
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Researcher, tel. (383)330-87-43, e-mail: and@opg.sscc.ru

Yuriy. A. Zagorulko
Institute of Informatics Systems SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Ph. D. Senior Research Fellow, Researcher, tel. (383)332-83-59, e-mail: zagor@iis.nsk.su

Olesya I. Borovikova
Institute of Informatics Systems SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, Researcher, tel. (383)330-79-91, e-mail: olesya@iis.nsk.su

In work the methodological basics are covered systematization of content of the thematic Internet resource «Active Seismology» on the basis of ontology of subject domain. The offered method allows to provide a uniform prestavleniye of knowledge and data, and also their semantic connectivity.

Key words: seismology, ontology, informational computing system, database.

В работе предложена систематизация знаний и данных в отдельной предметной области – активной сейсмологии [1] с использованием мощных сейсмических вибраторов. Понятие предметной области (ПО) является одним из фундаментальных, но в более узком смысле ПО может рассматриваться как область науки, объединяющая совокупность объектов, средств, приёмов, способов и методов исследований. Активная сейсмология включает в себя те направления геофизики, в которых для изучения строения и геодинамики литосферы Земли используются управляемые источники сейсмических волн.

Работы по активной сейсмологии проводятся в России, Японии, Китае, США и в европейских странах последние три десятилетия. В России в рамках экспериментальных исследований проводился вибросейсмический мониторинг литосферы в Алтае-Саянском регионе, Байкальской рифтовой зоне и Таманской грязевулканической провинции. В Японии с вибросейсмической системой ACCROSS проводится мониторинг сейсмоопасных и разломных зон земной коры.

В период 2010-214 гг. в ИВМиМГ совместно с другими организациями СО РАН получены значительные результаты по развитию методов активной сейсмологии, в частности, многовекторного вибросейсмического мониторинга сейсмогенных территорий и исследования геодинамических процессов в активированных зонах вулканов.

На основе низкочастотного центробежного сейсмического вибратора ЦВО-100 с усилием до 100 т.с. производится многовекторное виброзондирование, с целью выявления аномалий напряженно-деформированного состояния сейсмоактивной среды. Экспериментально показано, что использование малых сейсмических групп (антенн) позволяет проследить вибрационный сигнал на удалениях до 500 км. Были проведены эксперименты по глубинному вибросейсмическому зондированию Монголо-Сибирского региона в зоне сочленения Байкальского рифта и Центрально-Азиатского подвижного пояса. Методической основой работ является регистрация вибросейсмических сигналов на региональных профилях длиной до 500 км малыми сейсмическими группами (антеннами) с трехкомпонентными сейсмоприемниками и разработка специализированного программного обеспечения для выделения вибрационных зондирующих сигналов и пространственной селекции приходящих волн на больших расстояниях.

К настоящему времени в области активной сейсмологии накоплен большой объем информации по всем составляющим метода. Этот материал представлен в разрозненных источниках – статьях, монографиях, отчетах, на сайтах институтов и др.

С целью интеграции этих ресурсов была построена информационная система (ИС) «Активная сейсмология» [2]. Основными компонентами ИС являются: информационно-вычислительная система (ИВС), обеспечивающая пользователей многопараметрическим поисковым, вычислительно-аналитическим и ГИС сервисами для работы с данными сейсмического мониторинга в режиме on-line; пополняемая пользователями база данных научных работ – электронная библиотека; пополняемый пользователями библиографический каталог. Однако существующая на данный момент ИС не дает полного представления о ПО в целом.

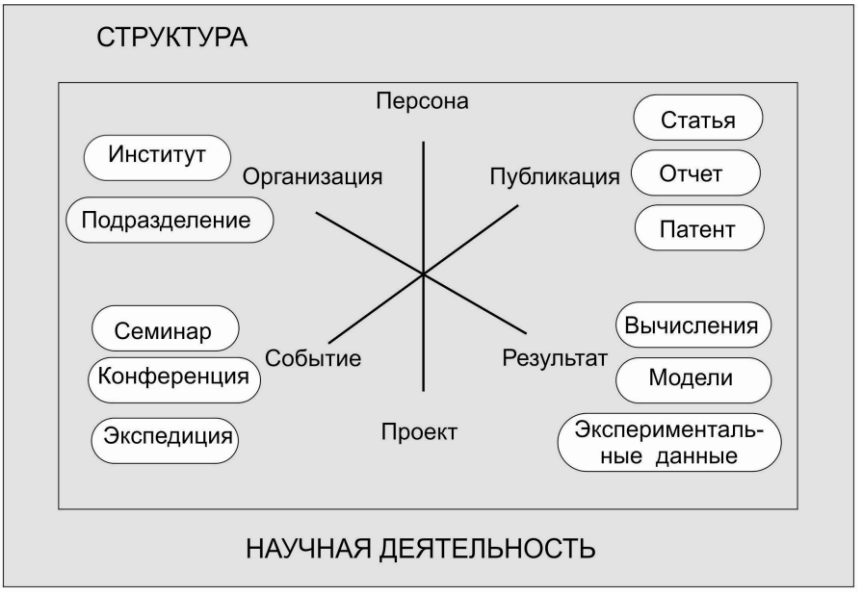


Рис. 1. Структура предметной области

Предметная область информационной системы рассматривается как совокупность реальных процессов и объектов (сущностей), представляющих интерес для её пользователей [3]. Основной задачей тематической информационной системы является организация эффективного взаимодействия и доступа к научной информации исследователей, работающих в конкретной предметной области. Для этого ИС должна обеспечивать целостное представление научного направления (персоны, организации, события, объекты и результаты исследований и т.п.) в информационном пространстве и обеспечивать в нем удобную навигацию.

Решение описанной задачи становится возможным благодаря выбору архитектуры специализированного Интернет-портала знаний [4], который должен обеспечивать интеграцию и систематизацию научных знаний и информационных ресурсов определенной тематики. Портал знаний должен обеспечивать доступ не только к собственным информационным ресурсам по активной сейсмологии, но и поддерживать навигацию по заранее размеченным (проиндексированным) ресурсам, размещенным в сети Интернет. Концептуальной основой портала является онтология ПО.

Концепция Интернет-портала предполагает разделение онтологии ИС на две части [4]. Первую из них составляют две базовые онтологии (онтология научной деятельности и онтология научного знания), которые не зависят от предметной области ИС.

Онтология научной деятельности включает классы понятий, относящиеся к организации научной и исследовательской деятельности, такие как Персона, Организация, Событие, Научная деятельность, Проект, Публикация и др. Онтология научного знания фиксирует основные содержательные структуры, используемые для построения онтологии областей знаний. Эта онтология содержит классы, задающие структуры для описания понятий конкретных областей знаний, такие как Раздел науки, Метод исследования, Объект исследования, Научный результат и др.

Вторую часть онтологии ИС составляет онтология предметной области, которая отражает общие знания об активной сейсмологии.

Предложена структура онтологии предметной области (рис. 2), описывающей понятия области знания по активной сейсмологии. В онтологии актив-

ной сейсмологии выделены основные понятия и связи между ними для представления результатов, объектов и методов исследований, а также характерных для этой области знаний понятий, описывающих сейсмические воздействия, отклик среды, источники, сенсоры и их географическое местоположение. Формальное описание онтологии будет разработано средствами редактора Protégé на языке OWL.

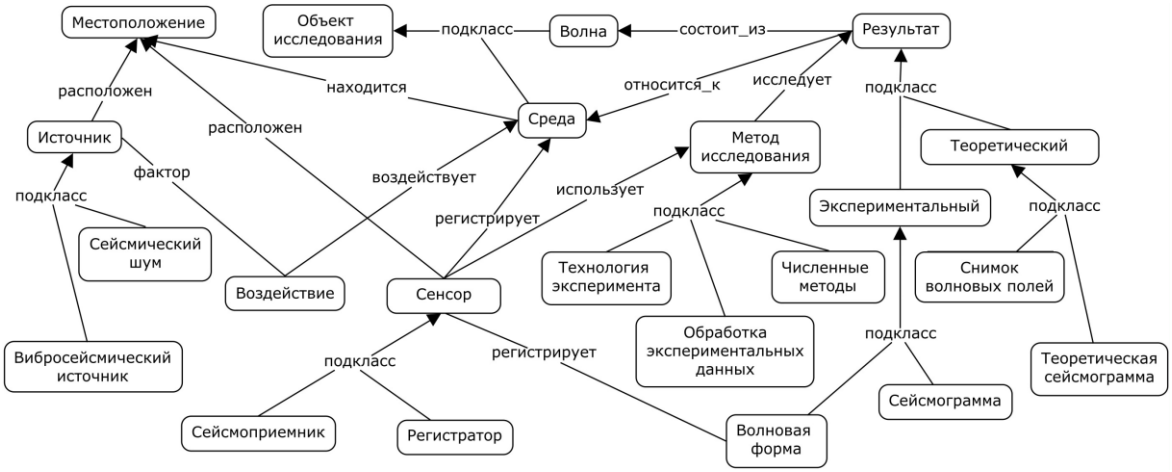


Рис. 2. Онтология ПО «Активная сейсмология»

Дальнейшая модернизация ИС «Активная сейсмология» будет проводиться на основе предложенной онтологии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-07-00832 и 15-07-06821.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тубанов Ц.А., Толочко В.В., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Базаров А .Д. Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий // Отечественная геология. - Москва: Издательство ЦНИГРИ, 2013. - 3: - С. 16-24.

2. Брагинская Л. П., Григорюк А. П. Информационная система для комплексной поддержки научных исследований в области активной сейсмологии // Вестник КемГУ. 2012 -4: - С. 43-48.

3. Ковалевский В. В., Брагинская Л. П., Григорюк А. П. Информационно-аналитическая система для вибросейсмических исследований // Проблемы информатики, № 3, Новосибирск, 2013, С. 22-29

4. Загорулько Ю. А., Боровикова О. И. Информационная модель портала научных знаний // Информационные технологии. – 2009. – № 12. – С.2-7.

© Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, Ю. А. Загорулько, О. И. Боровикова, 2015

УДК 550.388.2

ИОНОСФЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАД НОВОСИБИРСКОМ ДО, ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Анастасия Юрьевна Белинская
Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы СО РАН, 630060, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (913)477-60-18, e-mail: anbell@ngs.ru

Олег Митрофанович Грехов
Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы СО РАН, 630060, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика. Коптюга, 3, инженер-исследователь, тел. (913)477-60-18

В представленной работе рассмотрены методики для выявления сейсмо-ионосферных вариаций по данным вертикального зондирования ионосферы. Используя результаты многолетнего мониторинга ионосферы на Геофизической обсерватории «Ключи» (Новосибирск), были исследованы возможные эффекты землетрясений (в том числе и в период подготовки) на ионосферу. Рассмотрены землетрясения с магнитудой M > 5 и удаленностью эпицентра от обсерватории не более 850 км.

Ключевые слова: ионосфера, землетрясение, предвестники землетрясений, система литосфера – атмосфера – ионосфера.

IONOSPHERIC MEASUREMENTS OF NOVOSIBIRSK BEFORE, DURING AND AFTER EARTHQUAKES

Anastasiia Yu. Belinskaia
Altai-Sayansk branch of Federal state budgetary institution of science of Geophysical service of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630060, Russia, Novosibirsk, 3 av. of the academician Koptyuga, tel. (913)477-60-18, e-mail: anbell@ngs.ru

Oleg M. Grekhov
Altai-Sayansk branch of Federal state budgetary institution of science of Geophysical service of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630060, Russia, Novosibirsk, 3 av. of the academician Koptyuga, tel. (913)477-60-18

The results of long-term monitoring of the ionosphere at the Geophysical Observatory «Klyuchi» (Novosibirsk) are used for investigation of the effects of earthquakes to the ionosphere during preparation phase and under shock. We considered the earthquakes with magnitude M>5 and the epicenter distance from the observatory no more than 850 km.

Keywords: ionosphere, earthquake, earthquake precursors, the system Litosfera – atmosphere – ionosphere.

В настоящее время очень актуальны работы по расширению наших знаний о процессах в сложной системе Литосфера – Атмосфера - Ионосфера, которые запускаются во время подготовки сильных землетрясений. На повестке дня

стоит вопрос о возможности краткосрочного прогноза землетрясений. Одним из основных результатов исследований последних лет является факт, что прогноз, базирующийся на анализе вариаций какого-то одного из параметров окружающей среды, не может быть достоверным в силу сложности механизма генерации предвестников разного типа. Одновременная регистрация целого ряда признаков, называемых предвестниками, и являющихся проявлением процесса подготовки землетрясения в различных геофизических средах, и является тем фактором, или комплексным предвестником, на базе которого можно строить надежный прогноз [1]. В 2009 году стартовал пилотный проект по комплексному диагностированию предвестников землетрясений на Сахалине [2]. Не последнее место в этих исследованиях отводятся измерениям в ионосфере. Данная работа является продолжением работ по влиянию землетрясений на ионосферные параметры над Новосибирском [3, 4].

На Геофизической обсерватории «Ключи» (Новосибирск) ведутся ионосферные наблюдения с 60-ых годов. С конца 90-ых годов XX века на станции был установлен цифровой ионозонд, благодаря чему был накоплен архив данных в цифровом виде. Для анализа вариаций ионосферных параметров под воздействием сейсмоактивности нами были выбраны 6 сильных землетрясений с магнитудой M>5 и удаленностью эпицентра от обсерватории не более 850 км.

Исследования E-области в период процесса подготовки сильных землетрясений позволили выявить формирование аномальных спорадических Es-слоев. Замечено, что за несколько суток до землетрясения отмечается значительное увеличение критической частоты спорадического слоя (foEs), а за сутки до землетрясения происходит уменьшение коэффициента полупрозрачности (К). Для выделения аномальных возмущений в ионосфере в период подготовки землетрясений в качестве исходных данных используются значения критической частоты foEs и частоты экранирования fbEs. Расчет коэффициента полупрозрачности Es-слоя (dfbEs) выполняется для значений foEs>fbEs. по формуле: dfbEs=(foEs-fbEs)/fbEs. На следующем этапе вычисляется суточный коэффициент полупрозрачности (К) путем осреднения полученных значений коэффициента полупрозрачности за сутки местного времени. Эта методика описана в работах Липеровского В.А., S. Kon и др. [5, 6]. На рис. 1 представлены результаты анализа вариаций foEs и К над Новосибирском для одного из выбранных землетрясений. Расчеты проводились для 14 дней до и после события по ежечасным данным ионосферного зондирования. Видно, что за сутки до события коэффициент полупрозрачности упал и восстановился только через 2 суток после него. Увеличение критической частоты спорадического слоя было не значительным.

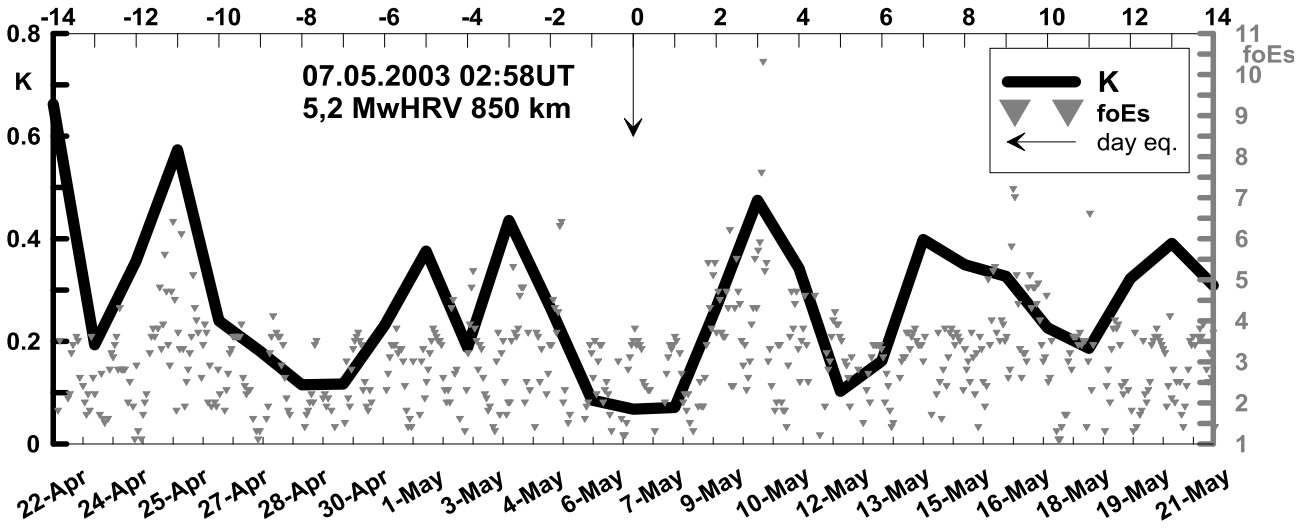


Рис. 1. Вариации foEs и K за 14 дней до, во время и 14 дней после землетрясения 07 мая 2003г. с M=5,2MwHRV и удаленностью эпицентра от станции «Ключи» на 850 км. Справа ось для foEs, слева - для K

Для выделения аномальных возмущений электронной концентрации на высоте главного максимума ионосферы в качестве фонового значения используется скользящее медианное значение (foF2m), рассчитанное по 15 предшествующим числовым значениям для определенного момента времени. Оценка отклонения текущего значения критической частоты от скользящего фонового значения производится по формуле: dfoF2=100*(foF2-foF2m)/foF2m, где foF2 - часовое значение критической частоты слоя F2. Продолжительное повышение этого значения (не менее 4- 6 часов) в условиях спокойной гелио-геомагнитной обстановки может быть результатом реакции ионосферы на процесс подготовки землетрясения, т.е. являться предвестником землетрясения. По этим отклонениям строят «маску» ионосферного предвестника землетрясения [7]. На рис. 2 представлен образец подобной «маски» для землетрясения 27 октября 2000 г. с магнитудой 5,5MwHRV и удаленностью 769 км от станции «Ключи». Видно, что за сутки до события было повышение dfoF2 в течение 2-3 часов после продолжительного сильного понижения этой характеристики.

Проведенный анализ показал неоднозначность выявленных вариаций. Для некоторых землетрясений мы можем говорить о наличие сейсмо-ионосферных связей, но, к сожалению, не для всех рассмотренных случаев. Работа в этом направлении необходимо продолжить. Так планируется провести сравнение с данными ионосферного зондирования на ближайших станциях.

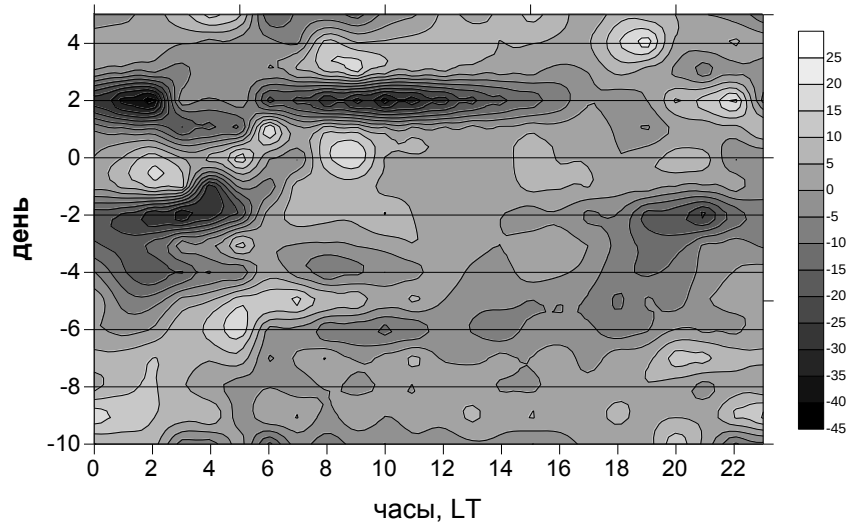


Рис. 2. «Маска» для землетрясения 27.10.2000 с M =5,5MwHRV и удаленностью 769 км. Справа приведена шкала величины dfoF2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в комплексной системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера-Магнитосфера / С. А. Пулинец, Д. П. Узунов, А. В. Карелин, К. А. Боярчук, А. В. Тертышников, И. А. Юдин // Гелиогеофизические исследования. - 2013. - Вып. 6. - С. 81-90.

2. Первые результаты пилотного проекта по комплексному диагностированию предвестников землетрясений на Сахалине / С. А. Пулинец, А. А. Романов, Ю. М. Урличич, А. А. Романов мл., Л. Н. Дода, Д. П. Узунов // Геомагнетизм и аэрономия. - 2009. - Т.49. - №1. - С. 1-10.

3. Сейсмические эффекты в ионосфере по результатам мониторинга F-слоя над Новосибирском / А. Ю. Белинская, С. Ю. Хомутов, О. М. Грехов // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 4. – С. 213-216.

Белинская А. Ю., Хомутов С. Ю. Возможности магнитно-ионосферных наблюдений в задачах прогноза и диагностики природных и техногенных экстремальных событий // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 3. – С. 37–45.

4. Физические модели связей в системе литосфера–атмосфера–ионосфера перед землетрясениями / В. А. Липеровский, О. А. Похотелов, К.-В. Мейстер, Е. В. Липеровская // Геомагнетизм и аэрономия. - 2008. - № 48. - С. 831–843.

5. Ionospheric anomalies possibly associated with M≥6.0 earthquakes in the Japan area during 1998–2010: Case studies and statistical study / S. Kon, M. Nishihashi, K. Hattori // Journal of Asian Earth Sciences. - 2011. - 41. - P. 410–420. - Англ.

6. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени / С. А. Пулинец, А. Д. Легенька, Т. И. Зеленова // Геомагнетизм и аэрономия. - 1998. - №38. - №3. - С. 188-193.

© А. Ю. Белинская, О. М. Грехов, 2015

УДК 551.521.64; 524.1:550.385

МОНИТОРИНГ НЕЙТРОНОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ В АТМОСФЕРЕ

Валерий Леонидович Янчуковский
Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий Обсерваторией солнечно-земной физики, тел. (383)330-12-61, e-mail: vjanch@gs.nsc.ru

Сергей Александрович Сюняков
Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, аспирант, тел. (383)330-12-61, e-mail: ssyunyakov@mail.ru

Василий Сергеевич Кузьменко
Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник Обсерватории солнечно-земной физики, тел. (383)330-12-61, e-mail: mp3.87@mail.ru

Для регистрации потока нейтронов в широком диапазоне энергий (от тепловых до релятивистских) представлен набор детекторов. Для каждого из детекторов комплекса приводятся зависимости эффективности регистрации нейтронов от их энергии. Определен относительный вклад нейтронов различных энергетических интервалов в общий счет каждого детектора. По результатам наблюдений сделана оценка барометрического эффекта для нейтронов в широком диапазоне энергий.

Ключевые слова: атмосфера, нейтронный поток, энергетический спектр, детектор.

MONITORING NEUTRONS IN A WIDE RANGE ENERGY IN THE ATMOSPHERE

Valeriy L. Yanchukovskiy
Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 pr. Akad. Koptyuga Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Observatory of Solar-Terrestrial Physics, tel. (383)330-12-61, e-mail: vjanch@gs.nsc.ru

Sergey A. Syunyakov
Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3pr. Akad. Koptyuga, Ph. D., student, tel. (383)330-12-61, e-mail: ssyunyakov@mail.ru

Vasiliy S. Kuzmenko
Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 pr. Akad. Koptyuga Junior Researcher Observatory Solar-Terrestrial Physics, tel. (383)330-12-61, e-mail: mp3.87@mail.ru

To register neutron flux over a wide energy range (from thermal to relativistic) provides a set of detectors. For each of the detectors are based neutron detection efficiency of their energy. Determine the relative contribution of different neutron energy intervals in the total score of each detector. According to the results of observations made assessment barometric effect for neutrons in a wide range of energies.

Key words: atmosphere, neutron flux, the energy spectrum, the detector.

Практически все нейтроны в атмосфере Земли возникают в результате взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атомов воздуха. В результате образуются нейтроны в широком диапазоне энергий: от тепловых до энергий первичных космических частиц. Вблизи поверхности Земли дейст-

вуют, как минимум, два источника нейтронов. При взаимодействии энергичных частиц КЛ с ядрами элементов, составляющих земную кору, генерируются нейтроны различных энергий. Можно говорить, что пассивным источником этих нейтронов (альбедо) является земная кора. Но ее роль в данном случае – это роль мишени. Радиоактивные газы земной коры радон, торон и актинон образуются в уран-радиевой, ториевой и уран-актиниевой сериях радиоактивного распада, соответственно. В процессе дальнейшего распада они испускают α-частицы различной энергии. Взаимодействия высокоэнергичных α-частиц, приводящие к образованию нейтронов, возможны не только с ядрами азота и кислорода, но и с ядрами других элементов, входящих в состав земной коры, и особенно, с ядрами кремния.

Для регистрации потоков тепловых, медленных и быстрых нейтронов в детекторах использованы широко известные большие пропорциональные борные счетчики нейтронов СНМ-15 [1]. Эти счетчики, в свое время, были специально разработаны для нейтронных мониторов NM-64 [2] и создания мировой сети станций космических лучей [3]. Счетчик представляет собой цилиндр диаметром 150 мм и длиной 2000 мм. Давление газа в счетчике 200 *мм. рт. ст.* Счетчики наполнены трехфтористым бором BF_3, обогащенным до 96% изотопом B_5^{10} [4], взаимодействие которого с нейтронами приводит к реакции $B_5^{10} + n_0^1 \rightarrow Li_3^7 + He_2^4$. Сечение захвата σ в широком диапазоне энергии нейтронов обратно пропорционально их скорости и достигает максимального значения для тепловых нейтронов, где $\sigma = 550*10^{-24}$ см^2, так что такой счетчик регистрирует в основном тепловые нейтроны. Эффективность счетчика максимальна для тепловых нейтронов и составляет 40% [5]. Счетчики нейтронов собираются по 3 в детекторные блоки (рис. 1).

Рис. 1. Детекторы нейтронов:
а, б – детектор нейтронов тепловых и надтепловых энергий; *в* - детектор промежуточных и быстрых нейтронов; *г* – нейтронный монитор NM-64

Все детекторные блоки идентичны и автономны. Положение счетчиков в блоке фиксируется направляющими из изоляционного материала (фторопласт). Корпус блока выполнен из алюминия. В корпусе каждого детекторного блока имеются высоковольтный нелинейный фильтр и усилители-дискриминаторы для считывания сигналов со счетчиков. Детектор тепловых и медленных нейтронов включает один выносной детекторный блок (рис. 1*а*) и два детекторных блока спаренных, расположенных один над другим, между которыми помещен листовой кадмий в 1 мм. (рис. 1*б*). С боков эти детекторные блоки также прикрыты листовым кадмием. Для регистрации быстрых нейтронов выполнен детектор (рис. 1*в*) на этих же счетчиках, окруженных слоем полиэтилена толщиной 7,5 см., выполняющего функцию термолизатора нейтронов. Для регистрации быстрых и релятивистских нейтронов используется нейтронный монитор NM-64 (рис. 1*г*), в котором имеется свинцовая мишень для локальной генерации нейтронов [2].

Дифференциальный энергетический спектр нейтронов в атмосфере, экспериментально полученный Hess'ом [6], и эффективность различных детекторов представлены на рис. 2.

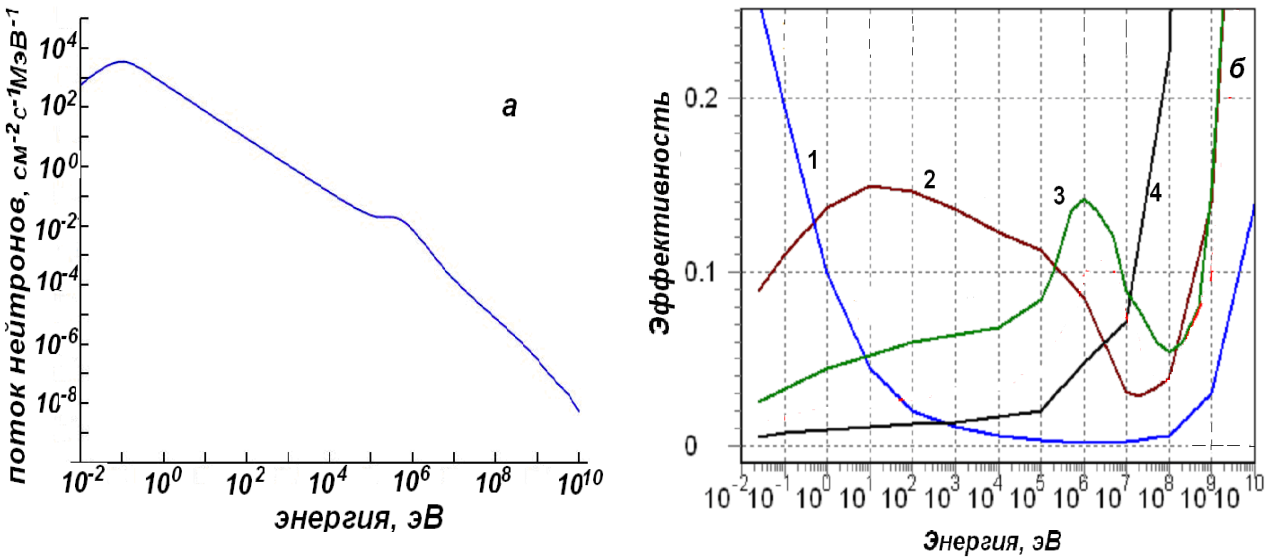


Рис. 2. Энергетический спектр нейтронов в атмосфере для уровня моря (*а*) и зависимость эффективности различных детекторов от энергии нейтронов (*б*). Цифрами у кривых обозначены по порядку приведенные детекторы нейтронов

На всем интервале энергий (10^{-2} – 10^{10} эВ) спектр имеет точность не хуже 25%. Эффективность регистрации нейтронов для каждого из приведенных детекторов представляет собой функцию энергии регистрируемых нейтронов. Эффективности детекторов различных конструкций находились путем моделирования [7] отклика детектора на падающий поток нейтронов. Оценим относительный вклад регистрируемых нейтронов различных энергетических диапазонов в каждый из детекторов. Если n - некоторый энергетический интервал $E_n \div E_{n-1}$ спектра нейтронов на уровне моря $J(E)$, то интенсивность нейтронов

в этом интервале равна $N_n = \int_{E_{n-1}}^{\infty} J(E)dE - \int_{E_n}^{\infty} J(E)dE$. Средняя энергия нейтронов для интервала n находится как $\overline{E}_n = \int_{E_{n-1}}^{E_n} J(E)EdE \Big/ \int_{E_{n-1}}^{E_n} J(E)dE$, а средняя эффективность регистрации нейтронов интервала n для детектора $\overline{\varepsilon}_n = \int_{E_{n-1}}^{E_n} \varepsilon(E)EdE \Big/ \int_{E_{n-1}}^{E_n} EdE$

Долевой вклад интервала n в общий счет детектора найдем как $k(\overline{E_n}) = \frac{N_n \cdot \overline{\varepsilon_n}}{\sum_n N_n \cdot \overline{\varepsilon_n}}$. Полученные результаты приведены на рис. 3.

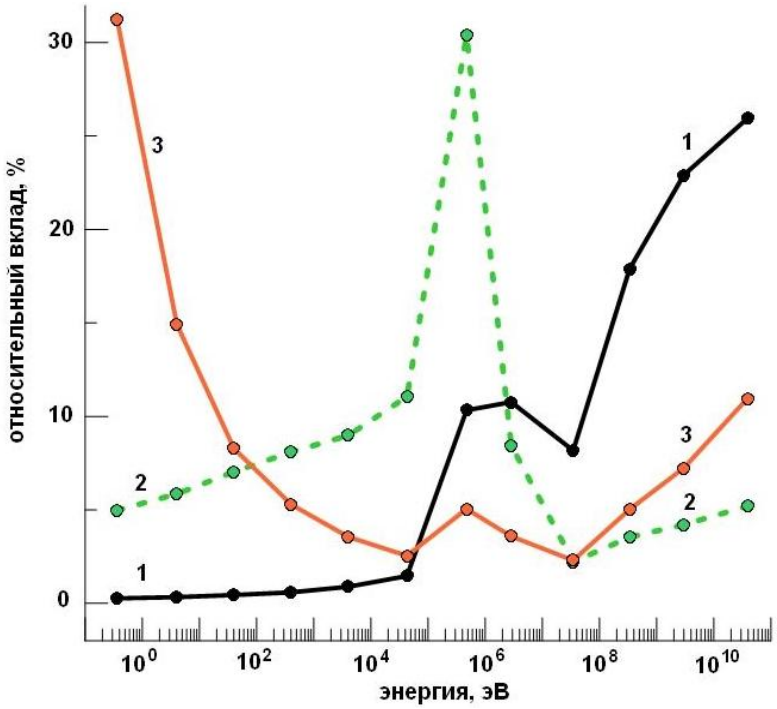


Рис. 3. Относительный вклад нейтронов различных энергетических интервалов в общий счет каждого из детекторов

Непрерывные наблюдения за интенсивностью потока нейтронов в широком энергетическом диапазоне проводится с помощью приведенного комплекса детекторов с сентября 2013 года по настоящее время. Наблюдаемые вариации интенсивности нейтронов в глубине атмосферы, обычно, представляют собой суперпозицию эффектов различной природы. Первичные вариации обусловлены изменениями энергетического спектра первичных космических лучей. Геомагнитные вариации происходят за счет изменений жесткости геомагнитного обрезания. Вариации атмосферного происхождения вызваны изменениями параметров атмосферы, самые ощутимые из которых – за счет вариаций атмосферного давления. Барометрическим эффектом нейтронного потока называют

изменения интенсивности нейтронов, связанные с изменениями атмосферного давления. Он складывается из абсорбционного эффекта, понижающего интенсивность нейтронов, и эффекта генерации нейтронов, приводящего к повышению интенсивности. То есть изменение плотности нейтронов во времени обусловлено увеличением этой плотности вследствие образования нейтронов и уменьшением их ввиду утечки и поглощения. Оценка барометрического эффекта плотности потока нейтронов в различных областях энергий производилась по данным непрерывных наблюдений. Для измерения интенсивности нейтронов различных энергий использовался представленный набор детекторов: открытые детекторные блоки с пропорциональными счетчиками тепловых нейтронов СНМ-15, блоки с кадмиевым фильтром, блоки, окруженные слоем полиэтилена и нейтронный монитор NM-64 со спектрографом на эффекте локальной генерации нейтронов [8]. Используя результаты непрерывных наблюдений, сделана с помощью регрессионного анализа оценка барометрических коэффициентов β интенсивности нейтронов различных энергий в атмосфере у поверхности Земли. Полученные результаты представлены на рис. 4.

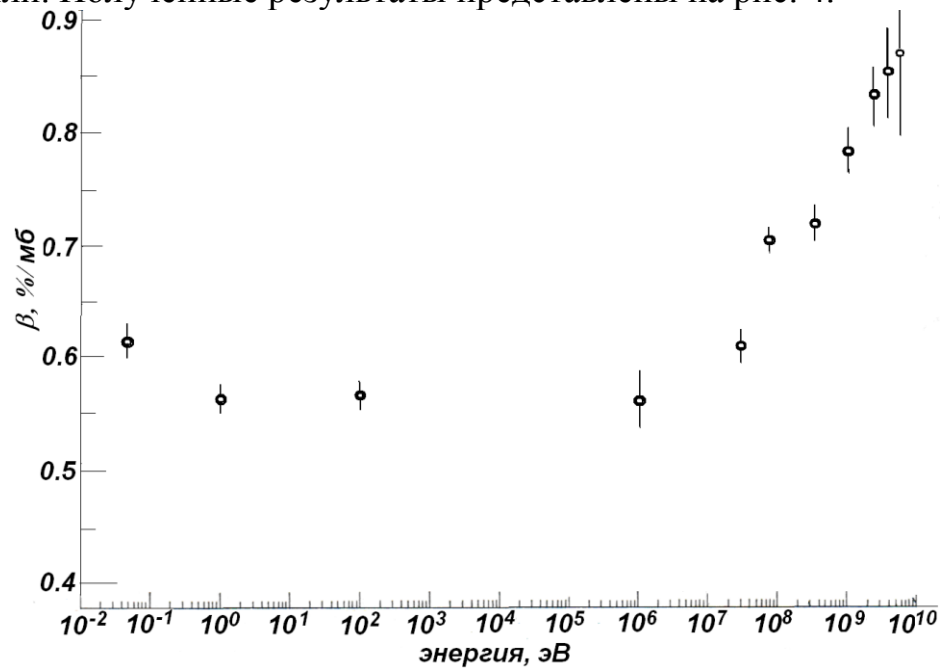


Рис. 4. Барометрические коэффициенты интенсивности нейтронов различных энергий в атмосфере у поверхности Земли

Наблюдаемая зависимость барометрических коэффициентов интенсивности нейтронного потока от энергии можно объяснить следующим образом. При вхождении первичных протонов космических лучей в атмосферу наблюдается в основном два процесса, приводящие к образованию быстрых нейтронов. Первый из них – это прямое взаимодействие первичных протонов с ядрами воздуха, в результате чего образуются нейтроны с энергией вплоть до энергий первичных частиц космических лучей [9]. Второй процесс – это ядерные расщепления (звезды), которые сопровождаются образованием нейтронов умеренных энергий. При прохождении через атмосферу происходит замедление нейтронов

в результате неупругих и упругих взаимодействий с ядрами воздуха [9]. При достижении энергии нейтронов низкого возбужденного уровня для кислорода и азота, неупругие взаимодействия нейтронов прекратятся. Дальнейшее замедление нейтронов будет за счет только упругих взаимодействий. Низший уровень возбуждения для кислорода составляет 6 МэВ, а для азота – 2,3 МэВ.

Таким образом, приведенный комплекс детекторов позволяет вести непрерывные наблюдения за вариациями интенсивности нейтронов в широком энергетическом интервале.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блох Я.Л., Дорман Л.И., Коява В.К. Большие нейтронные счетчики для супермониторов. // Космические лучи. М.: Наука, 1969. № 10. - С. 25 – 29.

2. Hatton C.J. and Carmichael H. Experimental investigation of the nm-64 Newtron Monitor. //Can. J. of Phys., 1964. V. 42. - P. 2443 – 2472.

3. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космически лучей. М.: Наука, 1975. 462 с.

4. Калашникова В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966. 407 с.

5. Асатиани П.Я., Блох Я.Л., Гагуа Т.А. Крупногабаритные нейтронные счетчики типа СНМ-15. // Труды Всесоюзной конференции по космическим лучам. (Ташкент, 1968). М.: Ротапринт ФИ АН СССР, 1969. Ч. 2. Вып. 3. - С. 101-104.

6. W.N. Hess, E.H., Canfield and R.E. Lingenfelter Cosmic-Ray Demography // J. Geophysical Research, 1961. V. 66. - P. 665-677.

7. Плетнев Е., Янке В. Эффективность регистрации нейтронных детекторов различной геометрии.// 31-я Всероссийская конференция по космическим лучам. Москва, МГУ, июль 2010. Гео 41.

8. Янчуковский В.Л., Янчуковский А.Л. Спектрограф космических лучей, основанный на эффекте локальной генерации нейтронов. // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1980. Вып. 52. - С. 52-56.

9. Янчуковский В.Л., Филимонов Г.Я. Барометрический эффект вторичных космических лучей. // Известия РАН. Серия физическая, 1997. Т.61. № 6. - С. 1159 – 1161.

© В. Л. Янчуковский, С. А. Сюняков, В. С. Кузьменко, 2015

УДК 550.343.4

ПОСТРОЕНИЕ ГИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КАРТЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ Г. УЛАН-УДЭ)

Цырен Алексеевич Тубанов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геологический институт» СО РАН, 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, кандидат геолого-минералогических наук, тел. (3012)43-32-11, e-mail: ttsyren@gmail.com

Петр Алексеевич Предеин
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геологический институт» СО РАН, 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, аспирант, тел. (3012)43-32-11, e-mail: crmpeter@gmail.com

Разработана структура базы данных для целей оценки сейсмической опасности территории. Особенностью является совмещение данных моделирования амплитудно-частотных характеристик грунтов и пространственной инженерно-геологической информации.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, сейсмическое микрорайонирование, географическая информационная система.

THE CREATION OF A GIS-BASED SEISMIC HAZARD MAPS OF URBAN AREAS (FOR EXAMPLE, ULAN-UDE)

Tsyren A. Tubanov
Russian Academy of Sciences Geological Institute of SB RAS, 670047, Russia, Ulan-Ude, 6a Sakhyanova str., Ph. D., tel. (3012)43-32-11, e-mail: ttsyren@gmail.com

Petr A. Predein
Russian Academy of Sciences Geological Institute of SB RAS, 670047, Russia, Ulan-Ude, 6a, Sakhyanova str., researcher, tel. (3012)43-32-11, e-mail: crmpeter@gmail.com

Developed database structure for the purposes of assessment of seismic hazard of territory. Feature is the combination of simulation data amplitude-frequency characteristics of soils and spatial geotechnical information.

Key words: seismic hazard, seismic microzonation, geographic information system.

В настоящее время в соответствии с требованиями новых информационных технологий создаются и функционируют многие системы управления, которые регулируют деятельность технических и социальных систем, функционирующих в некотором операционном пространстве (географическом, экономическом и т.п.) с явно выраженной пространственной природой. В области обеспечения сейсмической безопасности территорий также приоритетным является развитие ГИС-ориентированных систем информационного обеспечения и ситуационного анализа сейсмических рисков [Уломов, 2007].

Район Улан-Удэ характеризуется высокой сейсмической активностью. Фоновая сейсмичность территории, согласно карте сейсмического районирования [Карта…, 1999] - 8 баллов (8-возможная повторяемость землетрясений один раз в 100-1000 лет). В 1985 г. ВостСибтисизом было выполнено сейсмическое микрорайонирование территории города. По результатам работ выделены участки с сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов. Причем, на выделенных участках, сейсмичность дается двумя показателями 7 (8), 8 (7), 8 (8), 8 (9), 9 (8) и 9 (9). Первое значение указывает на сейсмичность верхней динамической зоны мощностью 10 м непосредственно с поверхности земли, второе - со снятием верхнего 3-х метрового слоя. Основными факторами, влияющими на изменение фоновой сейсмичности, являются грунтовые условия (верхняя часть разреза характеризуется сильной литологической изменчивостью грунтов: отмечается порядка 10-ти их литологических разновидностей, невыдержанных как по мощности, так и по простиранию), а также обводненность грунтов. Сейсмической интенсивностью в 7 баллов характеризуются участки распространения гранитных интрузий, в 8 баллов - склоны, сформированные на гранитных интрузиях при углах наклона поверхности 15-35° (здесь во время сильных землетрясений возможны сейсмогравитационные явления) и участки, где мощность рыхлых отложений не превышает 10 м. Сейсмическая интенсивность 8(9) баллов характерна для значительной части распространения песчаных грунтов (мощность рыхлых отложений от 15 до 90 м). Здесь 8 баллов без учета поправки на резонансный эффект, а 9 - с учетом поправки. Сейсмичность 9(9) характерна для крутых склонов, ограничивающих грядово-бугристую поверхность, сформированную на рыхлых песчаных отложениях высоких надпойменных террас.

Одной из проблем создания единой ГИС является консолидация разнородной информации в единую базу данных. Первым этапом для решения этой проблемы является определение структуры базы данных. Нами разработана схема ГИС-ориентированной системы оценки сейсмической опасности территории г. Улан-Удэ (рис. 1), которая предназначена для использования при решении следующих задач:

1. Уточнение карты сейсмического микрорайонирования (СМР) территории г. Улан-Удэ, количественная оценка сейсмического воздействия.

2. Создание базы данных сети инженерно-сейсмологического мониторинга зданий-представителей, объектов и сооружений повышенной ответственности.

Уточнение карты СМР подразумевает построение формате ГИС карт сейсмического микрорайонирования, формирование базы данных региональных акселерограмм возможных очагов землетрясений (ВОЗ), формирование базы данных инженерно-геофизических исследований (регистрация землетрясений, сейсморазведка, записи микросейсм) на участках различного типа (построение модели геологической среды, оценка мощности рыхлых отложений до глубины 30 м, характеристика типов грунтов) и расчеты спектра реакции грунтов городской территории на прогнозные сейсмические воздействия.

Рис. 1. Схема ГИС-ориентированной системы оценки
сейсмической опасности территорий

При создании электронной базы данных за основу взяты данные ВостСибтисиза по сейсмомикрорайонированию (СМР) территории г. Улан-Удэ на площади 210 кв. км. Были использованы следующие графические материалы м-ба 1:10000: карта фактического материала территории города, карта инженерно-геологических условий, карта глубин залегания прогнозного уровня подземных вод, карта сейсмического микрорайонирования, схема районирования территории г. Улан-Удэ по грунтовым условиям, в соответствии с табл. 1 [СНиП П-7-81*, 2011].

Проведены следующие подготовительные работы:

- Обработка и создание геоданных – сканирование и преобразование картографических материалов с бумажных носителей в электронный (растровый и векторный вид), географическая привязка данных, конвертация геоданных из формата в формат;

- Создание тематических карт – создание таблиц, карт, планов в печатной и цифровой формах с нанесением тематических данных

Итогом подготовительного периода стал выбор опорных геосейсмических разрезов для расчетов сейсмического отклика грунтов.

В дальнейшем предполагается создание единого онлайн-ресурса, консолидирующего базовую пространственную информацию и данные о сейсмической опасности для объектов жилья и инфраструктуры территории. Результатом такого решения является создание веб-приложения, где все имеющиеся данные (карты, аэрокосмоснимки, сведения различных ведомств, например Росреестра) приведены к единому формату.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карта общего сейсмического районирования территории Российской федерации. Масштаб 1:8 000000. – М: Министерство науки и технологий РФ, ОИФЗ им. О. Ю. Шмидта, 1999. – 57 с.

2. СНиП II-7-81*(Актуализированная редакция). Строительство в сейсмических районах. М.: Министерство регионального развития, 2011. – 71с.

3. Уломов В.И. О программно-математическом обеспечении построения карт вероятностного Сейсмического районирования по методологии ОСР-97 / Геофизические исследования: сб. научн. тр. Институт физики Земли РАН. Вып. 7. М.: ИФЗ РАН, 2007. – С.29-52.

© Ц. А. Тубанов, П. А. Предеин, 2015

УДК 550.34

ОРГАНИЗАЦИЯ КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ СЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СБОРА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Илья Николаевич Матвеев
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, магистрант, тел. (913)469-55-14, e-mail: ilmat192@gmail.com

В работе дается общее описание программной системы дистанционного сбора и обработки геофизических данных и ставится задача организации канала связи между ней и сейсмическим регистратором. Указываются проблемы, связанные с установлением этого канала, и приводятся возможные пути их решения.

Ключевые слова: сейсмология, программная система, удаленный сбор и обработка данных, обработка в реальном времени, сейсмический регистратор, канал связи, сеть сбора данных.

ARRANGEMENT OF COMMUNICATION CHANNEL FOR SEISMIC DATA COLLECTION BY NETWORK TECHNOLOGIES

Iliya N. Matveyev
Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marx Pr., Post-graduate student, tel. (913)469-55-14, e-mail: ilmat192@gmail.com

General description of software system for remote collection and processing of geophysical data is presented. The task of arranging communication channel between the system and the seismic recorder is set. The problems of arranging this channel and their solution approaches are shown.

Key words: seismology, software system, remote data collection and processing. real-time data processing, seismic recorder, communication channel, data collection network.

Развитие и совершенствование методов геофизического мониторинга окружающей природной и техногенной среды входит в перечень критических технологий РФ. Одной из основных целей подобного мониторинга является предупреждение повышенных экологических рисков для социальной среды, порождаемых природными и техногенными взрывами. В связи с этим создание программно-технических средств поддержки геофизического мониторинга является весьма актуальным.

Эффективным средством проведения подобного мониторинга представляется использование мобильных сейсмических групп (МСГ). МСГ способны базироваться в районе предполагаемого сейсмического события (например, взрыва или падения ступеней ракет-носителей) и оперативно осуществлять сбор и обработку данных.[1] В составе МСГ целесообразно использование ПО для сбора и обработки данных в режиме реального времени.

В [1] приводится описание перспективной программной системы «Незабудка», разрабатываемой на базе ИВМиМГ СО РАН. Система предоставляет собой программную базу для организации сбора и потоковой обработки данных

от пространственно распределенных сейсмических станций. Архитектурно система «Незабудка» представляет собой набор автономных программных модулей, взаимодействующих друг с другом с помощью каналов ввода-вывода POSIX. Каждый модуль функционирует по принципу «черного ящика», принимая данные по входу, обрабатывая их определенным образом и передавая на выход. Модули могут быть соединены в вычислительный конвейер произвольной структуры.

Модули системы условно разделяются на системные, которые обеспечивают работу самой системы (например, чтение данных с регистратора, их визуализация, передача по сети и сохранение на диск), и прикладные, которые реализуют отдельные задачи обработки данных. На данный момент реализовано большинство системных и прикладных модулей.[2]

Помимо работы над развитием самой программной системы ведется также работа по организации сети сбора данных на ее базе. В качестве аппаратной базы такой сети используется сейсмический регистратор «Байкал-8». Данный регистратор имеет порт Ethernet и способен передавать через него зарегистрированные данные в реальном времени по протоколу SeedLink. В свою очередь, в состав системы «Незабудка» входит модуль, подключающийся к SeedLink-серверу регистратора, принимающий от него данные и передающих их прикладным модулям системы.

Основной задачей при развертывании описываемой сети является обеспечение связи между регистраторами и удаленным компьютером, выполняющим обработку собранных данных. Здесь имеется две проблемы.

Во-первых, необходимо обеспечить со стороны регистратора доступ к интернету. Здесь может использоваться проводное подключение, однако оно доступно далеко не везде, где может быть установлена сейсмостанция. Более удобным видится мобильное подключение на основе 3G-модемов. Такой вид связи сравнительно дешев, а зона покрытия мобильных операторов имеет широкую географию. В качестве промежуточного узла между регистратором и модемом на начальном этапе построения сети целесообразно использовать маршрутизаторы, позволяющие реализовать одновременную передачу данных по каналу сотовой связи и через Интернет. Многие модели располагают USB-разъемами и способные самостоятельно работать с 3G-модемами.

Второй задачей является обеспечение подключения к SeedLink-серверу «Байкала» со стороны удаленного компьютера. Регистратор, подключенный к мобильному интернету с помощью маршрутизатора, имеет локальный IP-адрес и не виден из внешней сети. Самым простым решением при этом было бы использование услуги по предоставлению «белого» IP-адреса, доступной у мобильных операторов за дополнительную плату. Однако такой подход требует дополнительных расходов. Кроме того такое решение небезопасно, поскольку в самом простом случае дает возможность подключиться к регистратору сторонним пользователям.

Более целесообразным решением является использование виртуальной частной сети (Virtual Private Network, VPN). При такой схеме «белый» IP-адрес

требуется только для компьютера обработки данных, на котором разворачивается VPN-сервер. VPN-клиент, в свою очередь, должен находиться на маршрутизаторе, подключенном к регистратору. Для современного сетевого оборудования подобный функционал не является чем-то экстраординарным, и на рынке можно найти большое количество моделей, поддерживающих формирование виртуальных сетей и работу с 3G-модемами. После подключения маршрутизатора к VPN-серверу регистратор и модули «Незабудки» взаимодействуют с использованием IP-адресов установленной виртуальной сети. Еще одним преимуществом использования VPN является его безопасность, поскольку данные в этом случае передаются через защищенный туннель и шифруются. Общая схема предлагаемого канала передачи данных приведена на рис. 1.

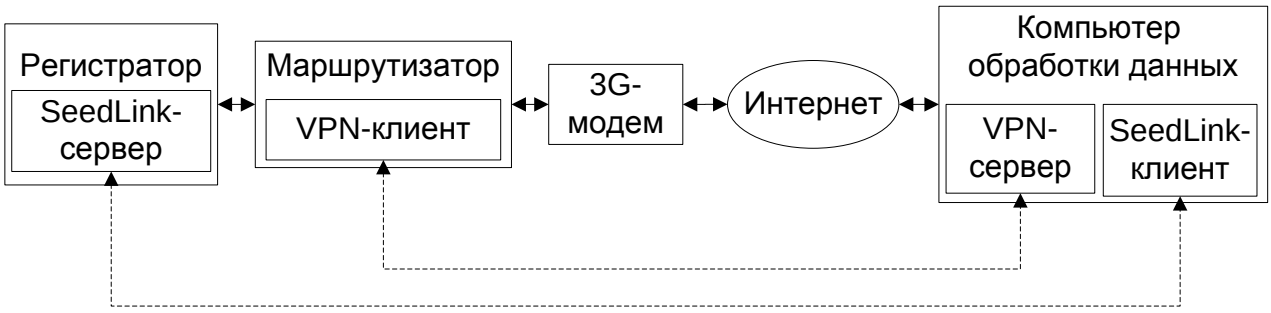


Рис. 1. Схема предлагаемого канала передачи данных

Таким образом, основные пути решения задачи обеспечения связи между регистратором и системой сбора и обработки данных определены. На текущий момент описанная схема подключения проходит апробацию в лабораторных условиях. В ближайшей перспективе планируется провести апробацию опытного образца сети в условиях сейсмического полигона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авроров, С. А. Программный комплекс сбора, обработки и анализа геофизических данных в условиях мобильных и стационарных сейсмических групп / С. А. Авроров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 207–210.

2. Программный комплекс дистанционного сбора и анализа геофизических данных // Разработка и проведение теоретических и экспериментальных исследований геоинформационной технологии оценивания экологического риска для окружающей социальной инфраструктуры от техногенных и природных катастроф : Отчет о НИР №С1-20(заключительный) [Электронный ресурс] / Новосибирский гос. технический ун-т; Руководитель В.В. Губарев. – с. 59-81.

© И. Н. Матвеев, 2015

УДК 532.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В Р. ЛЕНА ДЛЯ НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРОТИВОПАВОДКОВОЙ ЗАЩИТЕ

Александр Тимофеевич Зиновьев
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-64-74, e-mail: zinoviev@iwep.ru

Константин Борисович Кошелев
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-78-93, e-mail: koshelev@iwep.ru

Константин Валерьевич Марусин
Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, ведущий инженер лаборатории гидрологии и геоинформатики, тел. (3852)66-60-11, e-mail: kat@iwep.ru

Для научного обоснования разрабатываемых инженерных мероприятий по противопаводковой защите ряда населенных пунктов на р. Лена (республика Саха) создан комплекс компьютерных одномерных и двумерных горизонтальных моделей течений на основе уравнений Сен-Венана. Выполнены сопоставительные расчеты для определения эффективности предлагаемых мероприятий по строительству защитных сооружений и проведению русловыправительных работ.

Ключевые слова: наводнения, р. Лена, математическое моделирование, противопаводковые мероприятия.

MATHEMATICAL MODELING OF FLOWS IN LENA RIVER FOR SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF ENGINEERING MEASURES FOR FLOOD PROTECTION

Alexander T. Zinoviev
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 656038, Russia, Barnaul, 1 Molodyoznaya St., Ph. D., head of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, tel. (3852)66-64-74, e-mail: zinoviev@iwep.ru

Konstantin B. Koshelev
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 656038, Russia, Barnaul, 1 Molodyoznaya St., Ph. D., senior researcher of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, tel. (3852)66-78-93, e-mail: koshelev@iwep.ru

Konstantin V. Marusin
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 656038, Russia, Barnaul, 1 Molodyoznaya St., engineer of Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, tel. (3852)66-60-11, e-mail: kat@iwep.ru

For scientific substantiation of proposed measures for flood protection of settlements on the Lena river (Republic of Sakha) created the complex of computer one-dimensional and two-

dimensional horizontal models of flows based on the Saint-Venant equations. Comparative calculations of the effectiveness of the proposed building of dams and engineering measures in river bed were realized.

Key words: floods, Lena river, mathematical modeling, flood protection measures.

Введение. Для уточнения имеющихся данных о масштабах вредного воздействия вод на населенные пункты на р. Лена (на территории Иркутской области и республики Саха), а также с целью научного обоснования эффективности предлагаемых инженерных решений по противопаводковой защите населенных пунктов были построены а) компьютерная гидродинамическая модель рассматриваемого протяженного участка р. Лена, позволяющая рассчитать максимальные уровни водной поверхности у населенных пунктов по данным на гидропостах (г/п) и б) плановые компьютерные модели течений для отдельных участков р. Лена в районе населенных пунктов (н.п.).

Постановка задач. Одномерная компьютерная модель течения на протяженном участке р. Лена построена на основе системы одномерных нестационарных уравнений Сен-Венана. Для создания компьютерной модели течения использованы данные о расходах на г/п Чанчур, Кучуг, Коношаново, Усть-Кут (Закутье), Таюра, Макарово, Змеиново. Морфометрические данные для рассматриваемого участка р. Лена определены в 166 створах. Для каждого створа заданы минимальный уровень отметки дна в Балтийской системе координат для данного сечения и поперечное сечение долины реки с его геометрическими и морфометрическими характеристиками (морфоствор). Разница между расчетными и наблюдаемыми (оценочными для случая половодья 1% обеспеченности) уровнями поверхности воды не превышает 40 см.

Плановая компьютерная модель течения на участках со сложной морфометрией русла построена на основе математических моделей и методов их численной реализации, подробно изложенных в [1, 2].

Результаты расчетов. На рис. 1 приведены результаты численного моделирования течения в р. Лена на участке от д. Чанчур до п. Витим протяженностью около 1344 км. Здесь по ось X отложено расстояние по руслу р. Лена; отметка «1344 км» соответствует местоположению д. Чанчур; отметка «0 км» отвечает положению п. Витим. Отметка «516 км» соответствует положению д. Макарово.

В качестве примера на рис. 2 показан рассчитанный уровень поверхности воды вдоль русла р. Лена в районе д. Макарово в пик половодья 2001 г. В чем его смысл? По данным послепаводковых обследований при максимальных уровнях подъема воды в половодье подтапливается северная часть этого населенного пункта. Так, в 2001 г. наблюдался заход воды в населенный пункт по пойме ручья, а вдоль береговой линии вода доходила до уровня асфальтовой дороги. Рассчитанные по 1DH-модели уровни воды близки к уровням, определенным по результатам гидрологических расчетов уровней при расходах 1% обеспеченности и используемым при ГИС-моделировании границ территории затопления для данного населенного пункта. Подтвержденные математическим

моделированием результаты ГИС-моделирования обоснованно используются для разработки инженерных мероприятий противопаводковой защиты.

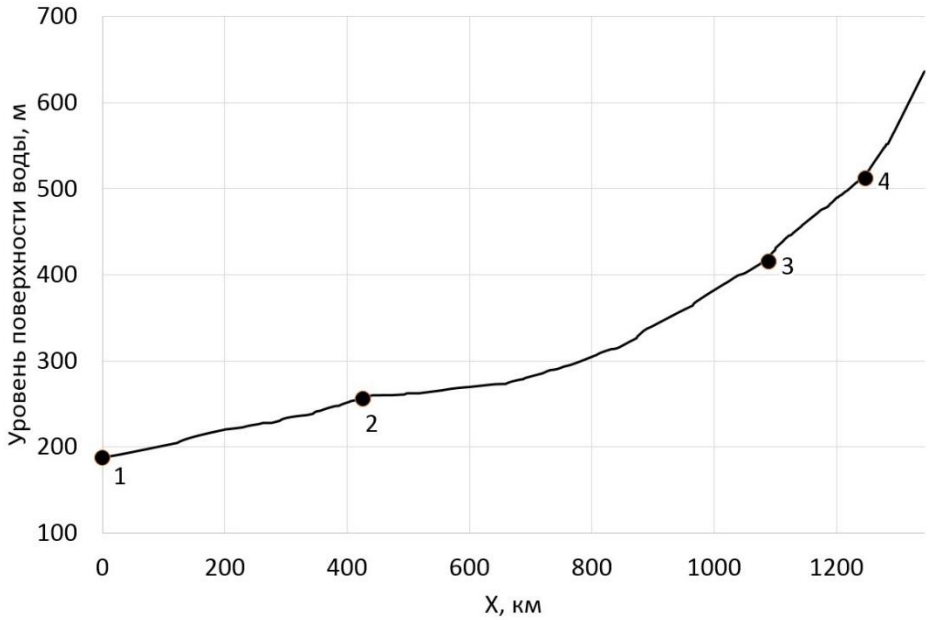


Рис. 1. Расчетный уровень поверхности воды вдоль русла р. Лена для расходов половодья 1% обеспеченности (цифрами обозначены максимальные исторически наблюденные уровни воды: 1 – Витим, 2 – Змеиново, 3 – Жигалово, 4 – Качуг)

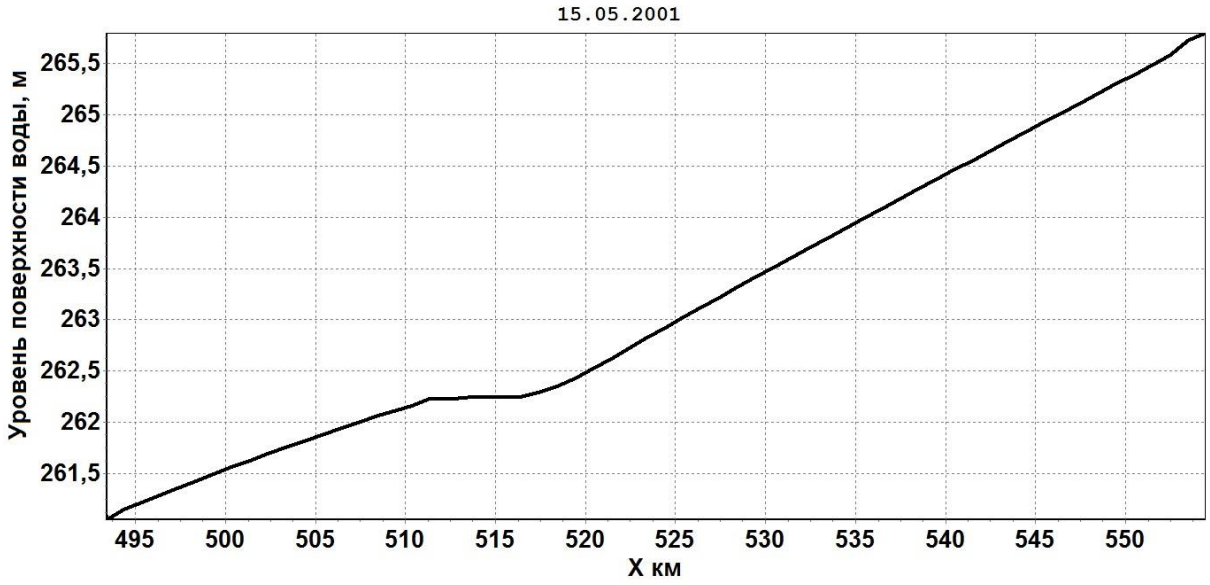


Рис. 2. Расчетный уровень поверхности воды вдоль русла р. Лена в районе д. Макарово в пик половодья 2001 г.

Для научного обоснования эффективности предлагаемых инженерных решений по противопаводковой защите н.п. выполнены расчеты с использованием плановых компьютерных 2DH-моделей течения на участках р. Лена вблизи

рассматриваемых поселений. В качестве примера рассмотрим влияние строительства дамбы около поселка городского типа (п.г.т.) Пеледуй (рис. 3) и углубления дна левого рукава р. Лена на границы затопления при наличии затора для расхода 1% обеспеченности.

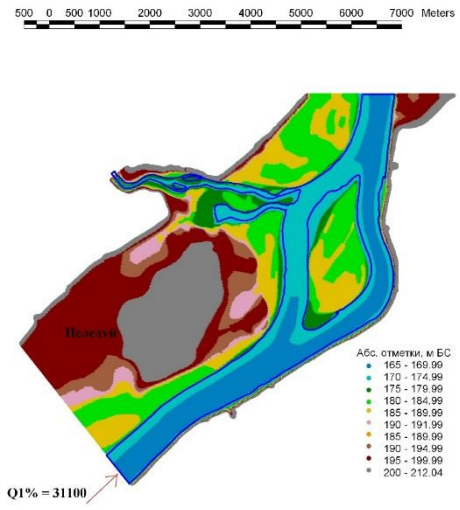
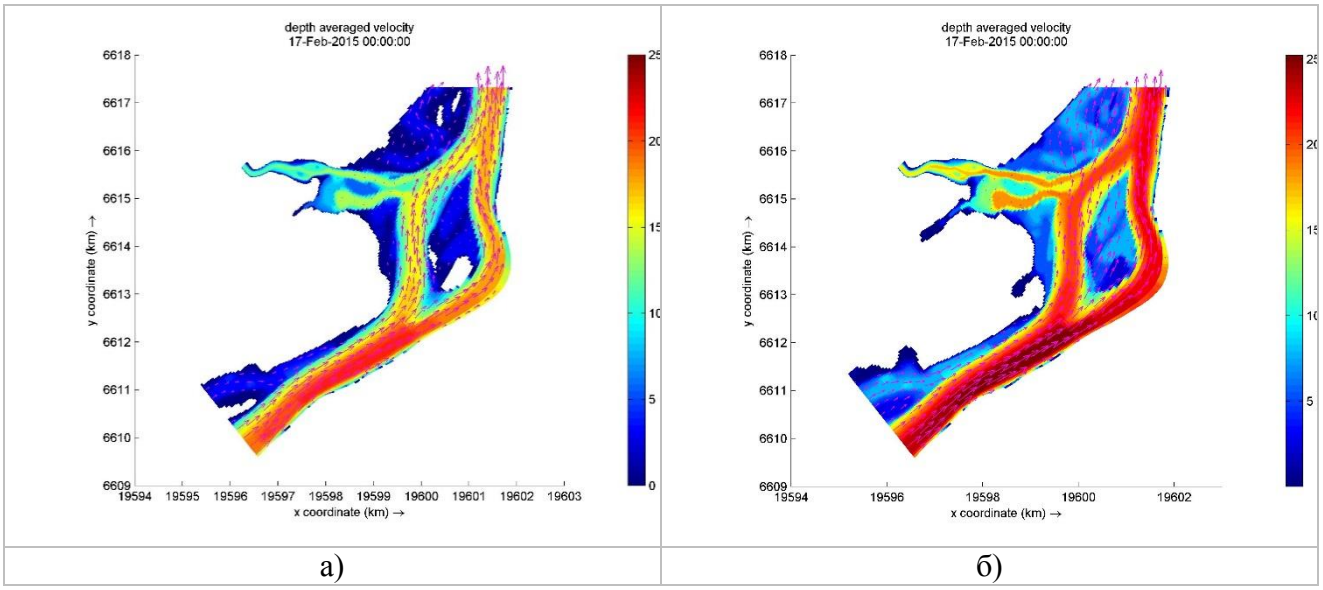


Рис. 3. Схема участка р. Лена около п.г.т. Пеледуй

Расход 1% обеспеченности для рассматриваемого участка реки равен 31100 м^3/с. В данном случае для компьютерного моделирования использовался программный комплекс с открытым кодом Delft3D. Расчетная сетка содержала 164 х 218 узлов. Затор моделировался заданием повышенного уровня воды в замыкающем створе расчетного участка.

Результаты вычислений для исходного рельефа участка русла р. Лена без затора представлены на рис. 4а, а при наличии затора – на рис. 4б.

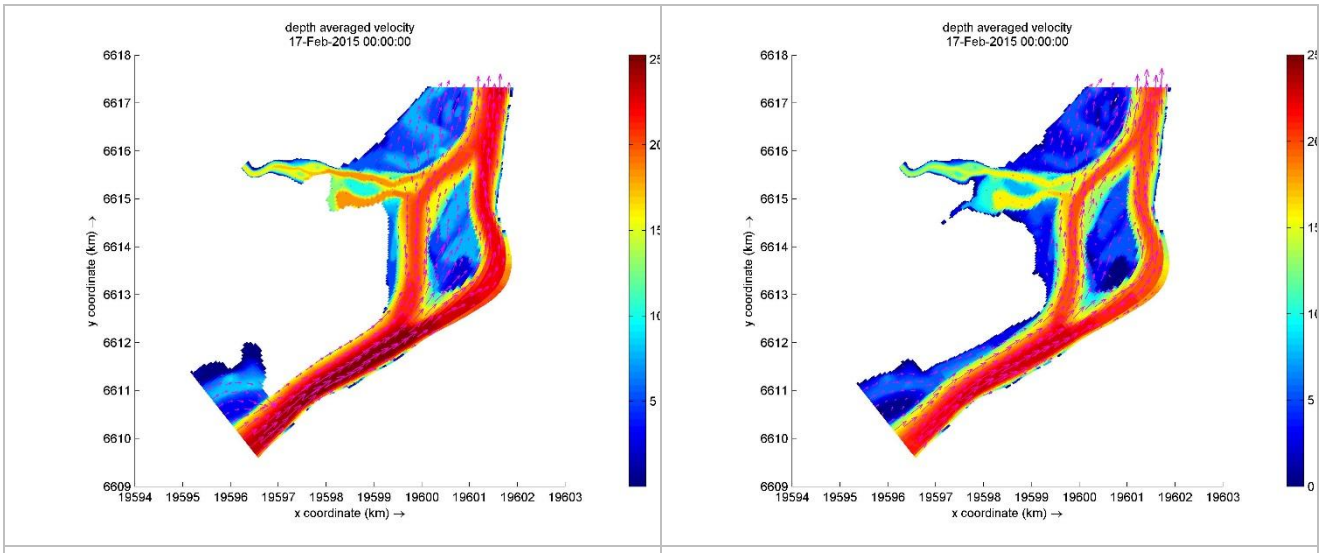


а) б)

Рис. 4: а) глубина воды и скорости течения для исходного рельефа без затора; б) глубина воды и скорости течения для исходного рельефа при наличии затора

Спроектированное положение дамбы позволяет избежать затопления пойменной территории, прилегающей к п.г.т. Пеледуй. Результаты вычислений для рельефа поймы с дамбой при наличии затора приведены на рис. 5а.

Другим способом уменьшения негативного влияния затора является углубление русла реки. При проведении расчетов принималось, что углубление левого рукава р. Лена равно 1 м. Результаты вычислений для рельефа с прорезью при наличии затора приведены на рис. 5б. Расчеты показали, что влияние затора на уровень воды уменьшится вдвое.



а) б)

Рис. 5: а) глубина воды и скорости течения для рельефа с дамбой при наличии затора; б) глубина воды и скорости течения для рельефа с прорезью левого рукава р. Лена при наличии затора

По положению границ течения на рис. 4а и 5б можно заключить, что в данном случае углубление русла реки полностью снимает влияние заторообразования.

Выводы. Из результатов расчетов следует, что строительство дамбы позволит полностью обезопасить п.г.т. Пеледуй от последствий половодья с расходом 1% обеспеченности, но не уменьшит воздействие самого затора на уровень воды. Углубление русла может значительно уменьшить негативное влияние затора на уровни воды, однако полностью избежать подтопления окраин поселка при предполагаемом дноуглублении не удастся.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б. Моделирование процесса затопления пойменных территорий для участков крупных рек со сложной морфометрией русла и поймы // Водное хозяйство России. – 2013. – № 6. – С. 17–31.

2. Delft3D-FLOW User Manual. WL j Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 2010.

© А. Т. Зиновьев, К. Б. Кошелев, К. В. Марусин, 2015

УДК 551.513

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ОКЕАНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА ОТКЛИК ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА УДВОЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ CO_2

Ирина Владимировна Боровко
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: irina@ommfao1.sscc.ru

Владимир Николаевич Крупчатников
Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, доктор физико-математических наук, директор, тел. (383)222-25-30

В ряде работ показано, что на взаимодействие между атмосферой и океаном в совместных моделях значительно влияет то, каким образом параметризации потоков учитывают скорость океанических течений. В [1] показано, что эффект течений наиболее значителен в тропиках.

В данной работе с помощью модели промежуточной сложности исследуется влияние океанических течений на реакцию атмосферы на изменения CO_2.

Ключевые слова: циркуляция атмосферы, течения, динамика климата, потоки тепла, концентрация углекислого газа.

OCEANIC CURRENTS PARAMETERIZATION EFFECT ON EARTH'S SURFACE TEMPERATURE RESPONSE AND CO_2 CONCENTRATION

Irina V. Borovko
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Akademika Lavrentyeva St., Ph. D., scientific associate, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, tel. (383)330-61-51, e-mail: irina@ommfao1.sscc.ru

Vladimir N. Krupchatnikov
Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, 630099, Russia, Novosibirsk, 30 Sovetskaya St., Ph. D., director, tel. (383)222-25-30

It is stated in a number of works that atmosphere – ocean interaction in coupled models depends on flows parameterizations taking into account ocean currents velocity. It is shown in [1] that currents effect is most significant in tropics.

The model of intermediate complexity is applied to study ocean currents effect on atmospheric response to CO_2 changes.

Key words: atmospheric circulation, currents, climate dynamics, heat flows, carbon dioxide concentration.

Реакция температуры поверхности Земли на изменения радиационного баланса атмосферы зависит как от отклика климатической системы, так и от того, с какой скоростью идёт поглощение энергии глубоким океаном. Радиационный форсинг в атмосфере вначале влияет на температуру в тропосфере и переме-

шанном слое, а потом на глубокий океан. В ряде исследований отклик климатических полей на увеличение концентрации CO_2 раскладывается на две составляющих - "быструю" и "медленную". Время релаксации динамических полей к основному состоянию определяется взаимодействием атмосферы и океана.

Кроме явных и скрытых потоков тепла, одним из механизмов энергетического обмена между атмосферой и подстилающей поверхностью является ветровое трение. В [1] было показано, что мощность ветрового трения определяется скоростью океанических течений. В этой работе течение раскладывалось на геострофическую и агеострофическую составляющую. Во внетропических широтах преобладает геострофическая составляющая, а в тропиках - агеострофическая, которую можно оценить с помощью параметризации Экмана.

Как правило, при моделировании взаимодействия атмосферы и океана влияние течений на поток тепла с поверхности считается пренебрежимо малым. Однако в ряде работ показано, что скорость течений значительно влияет на климатологию. В данной работе исследуется зависимость реакции климатологии на увеличение концентрации углекислого газа от скорости течений. Для численного эксперимента использовалась модель промежуточной сложности "Planet Simulator", разработанная в Метеорологическом институте Гамбургского университета.

Было проведено два численных эксперимента. Динамические поля в случае, когда течения были оценены с помощью параметризации Экмана, сравнивались с контрольном экспериментом, в котором напряжения трения ветра и потоки тепла и влажности не зависели от скорости течений. Проводились вычисления в течение двадцати лет модельного времени до выхода на стационарный режим. В обоих случаях концентрация CO_2 скачкообразно увеличивается в два раза и оценивается реакция средней поверхностной температуры. Экмановские скорости задаются в виде

$$u_s = -\vec{k} \times \tau / \tilde{f} \rho_w H_0,$$

где $\tau_x = \rho_a C_D |\vec{u}_a| u_a$, $\tau_y = \rho_a C_D |\vec{u}_a| v_a$ - напряжение трения ветра

$C_D = 10^{-3}$ - коэффициент трения

$H_0 = 20 м$ - глубина слоя перемешивания, $\rho_w = 10^3 кг/м^3$ - плотность воды, $\rho_a = 1,29 кг/м^3$ -плотность воздуха ,

$\tilde{f} = 2 \cdot \omega \cdot \sin(\varphi)$ за исключением области вблизи экватора, где $1/\tilde{f}$ аппроксимируется линейной функцией.

Экмановские течения перпендикулярны скорости ветра, поэтому можно оценить изменение потоков и мощности ветрового трения.

Модуль скорости течения $u_s = \dfrac{C_d \rho_a}{f \rho_w H_0} u_a^2 = \alpha u_a^2$. Коэффициент α в тропиках имеет порядок $0,5 \cdot 10^{-2} м^{-1} \cdot c$, среднеквадратическая скорость ветра ~5м/с. Поэтому при равных значениях температуры и скорости потоки тепла и влажности и мощность ветрового трения увеличатся на 0.1% .

Численный эксперимент показал усиление переноса тепла от низких широт к высоким, и, соответственно, похолодание на экваторе и потепление в средних и высоких широтах. При этом потоки тепла в субэкваториальной зоне северного полушария уменьшаются, а южного – увеличиваются. Это связано с тем, что фактическая южная граница северной ячейки Гадлея смещена к югу от экватора. На рис. 1. показано изменение во времени температуры, осреднённой по широте в случае постоянной концентрации CO_2 и в случае, когда концентрация CO_2 скачкообразно меняется. В случае, когда рассматриваются течения, средняя температура поверхности Земли выше на 0.1^0C. На рис. 2 показана среднегодовая температура в зависимости от широты для эксперимента с удвоением CO_2. В случае, когда учитывается поле течений, среднегодовая температура на экваторе выше, чем в случае без течений. Наблюдается увеличение времени релаксации к основному состоянию.

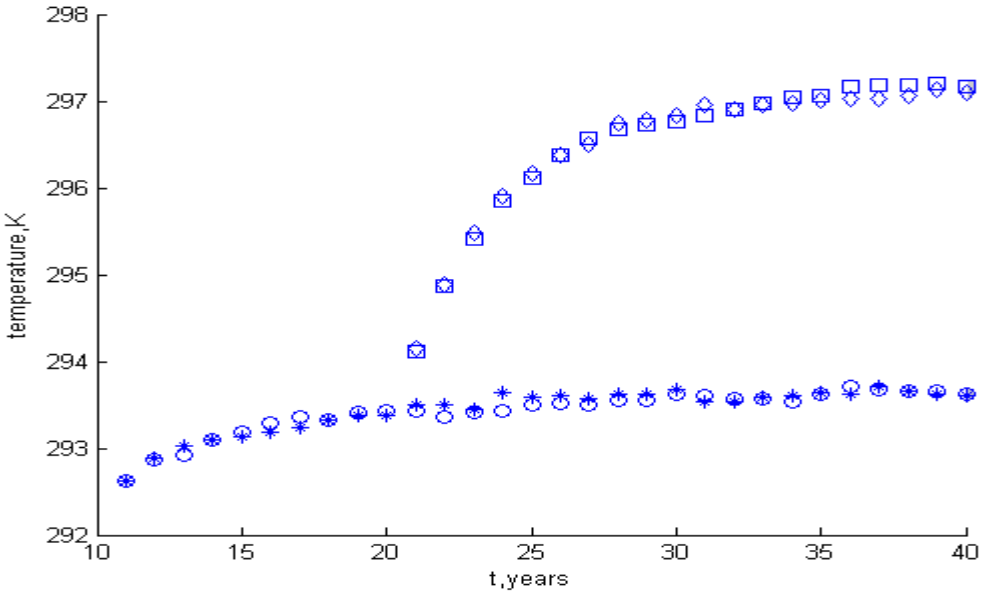


Рис. 1. Средняя температура поверхности в зависимости от времени. Звёздочками обозначен эксперимент, не учитывающий скорость течений, кружочками - учитывающий, квадратиками показана среднегодовая температура после удвоения концентрации CO_2 в эксперименте с течениями, ромбиками - в контрольном

Численный эксперимент показал, что при усилении взаимодействия атмосферы с океаном происходят заметные изменения динамических полей, при этом выход на стационарный режим происходит медленнее. Экмановской параметризации недостаточно для описания динамики внетропических широт, где течения в большей степени определяются геострофическими соотношениями. Климатический режим в моделях зависит от того, каким образом параметризовано влияние глубокого океана. Для оценки влияния глубокого океана должна быть использована полная совместная модель океана и атмосферы.

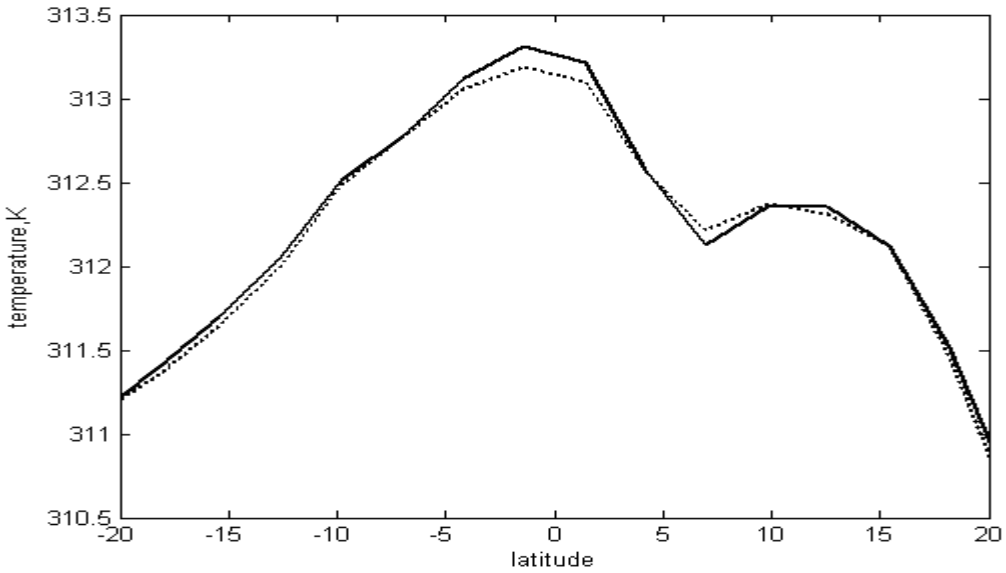


Рис. 2. Среднегодовая температура в зависимости от широты. Пунктирная линия - без течений, сплошная- с течениями. Случай с удвоением CO_2. Усреднение за 5 лет - (36-40 годы)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dawe, J. T. and L. Thompson. PDO-related heat and temperature budget changes in a model of the North Pacific. *J. Climate*, 20, 2007, p. 2092-2108,

© И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

1. *А. В. Семенцов, В. Н. Никитин.* О возможности калибровки камер без использования координат опорных точек 3
2. *А. В. Семенцов, В. Н. Никитин.* Применение математической модели штатива в методике калибровки камер без использования координат опорных точек 8
3. *А. В. Семенцов, В. Н. Никитин.* Сравнение результатов калибровки камер, полученных с использованием различных методик и моделей дисторсии 17
4. *Л. Г. Евстратова.* Использование «истинных» ортофотопланов (true ortho) в географических исследованиях 24
5. *Д. В. Мозер, А. С. Туякбай, Н. И. Гей, А. Д. Каранеева, А. Р. Естаева.* Мониторинг деформаций земной поверхности методом спутниковой радарной интерферометрии на территории шахты имени Костенко 29
6. *В. С. Коркин, А. Е. Червова.* Сравнительный анализ результатов тестирования ЦФС PHOTOMOD с помощью маршрутов высокоточных цифровых макетных снимков 34
7. *Е. И. Сапрыкин, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик.* Оценка состояния посевов зерновых культур по данным дистанционного зондирования Земли 40
8. *Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик.* Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур с использованием индекса вегетации 47
9. *М. П. Шагаев, Е. Н. Кулик.* Оценка возможностей использования данных прибора MODIS для мониторинга паводковой обстановки на примере паводка на реке Чулым весной 2014 года 53
10. *Г. Г. Горбунов, К. Н. Чиков, В. Б. Шлишевский.* Применение видеоспектрометрической аппаратуры дистанционного зондирования в геологии и экологии 60
11. *А. С. Гордиенко.* Применение индексных изображений при выявлении изменений по разновременным космическим снимкам 67
12. *Д. Н. Раков, В. Н. Никитин, С. О. Шевчук.* Использование неметрических цифровых камер при выполнении аэрогеофизических исследований 71
13. *Е. В. Казяк, А. В. Лещенко.* Спектральные преобразования космических снимков Landsat 8 для картографирования растительности агроэкосистем 79
14. *Е. В. Казяк, А. А. Кохно, Е. О. Хрущева.* Изучение структуры и динамики земельных угодий на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере Полесского государственного радиационно-экологического заповедника) 84
15. *И. Г. Ященко, Т. О. Перемитина.* Мониторинг экологического состояния нефтедобывающих территорий Западной Сибири с применением данных дистанционного зондирования 89
16. *Ю. Г. Никитина, В. Е. Гагин.* Исходные картографические материалы при создании карт антропогенного воздействия на ландшафты 94
17. *Э. Р. Семакова.* Предварительные результаты построения цифровой модели рельефа для некоторых районов Центрального и Западного Тянь-Шаня 99
18. *В. Н. Антонов, О. Г. Новгородцева.* Мониторинг и картографирование паводковой ситуации в Сибирском федеральном округе 104
19. *А. А. Якименко, Д. А. Караваев, А. В. Беляшов.* Моделирование сейсмических полей в задаче контроля и прогнозирования последствий подземных ядерных испытаний 111
20. *М. С. Юдин.* Расчет скоростей гравитационных течений при обтекании крутых препятствий в стратифицированной атмосфере 116

21. *М. С. Хайретдинов, Г. М. Воскобойникова, Г. Ф. Седухина.* Информативные факторы взаимодействия сопряженных полей в проблеме геофизического мониторинга 120
22. *В. Ф. Рапута, Н. П. Ахматова, Т. В. Ярославцева, В. В. Турбинский.* Исследование выпадений пыли в окрестностях ТЭЦ г. Новосибирска 125
23. *Н. Н. Семаков, А. А. Ковалев, О. И. Федотова, А. Ф. Павлов.* О скорости движения магнитных полюсов и необходимости создания российской службы истинного магнитного полюса 130
24. *Э. А. Пьянова.* Исследование процессов переноса пассивной примеси в атмосфере Прибайкалья на основе сценарного численного моделирования 135
25. *А. В. Пененко, А. А. Сороковой.* Применение дискретно аналитических схем для численного решения коагуляционного уравнения Смолуховского 140
26. *А. В. Пененко.* Прямой вариационный алгоритм усвоения данных атмосферной химии 145
27. *В. А. Шлычков, В. А. Огородников, О. В. Сересева.* Совместная численная стохастическая модель временных рядов суточного стока реки и пространственно-временных полей суточных сумм жидких осадков 150
28. *В. В. Малахова.* Моделирование современного состояния подводной мерзлоты шельфа Восточной Сибири 155
29. *А. А. Леженин, В. Ф. Рапута, Т. В. Ярославцева, И. А. Соловьёва.* Оценка влияния рельефа местности на распространение пылевых выбросов Искитимского цементного завода 160
30. *Л. И. Курбацкая, А. Ф. Курбацкий.* Мезомасштабная численная модель городского острова тепла в устойчиво стратифицированной окружающей среде 165
31. *В. И. Кузин, Н. А. Лаптева.* Расчеты стока рек Сибири в XXI веке 170
32. *В. А. Шлычков, А. И. Крылова*. Исследование чувствительности численной модели сложноразветвленной дельты р. Лена к заданию краевых условий на морских границах 175
33. *В. В. Ковалевский, Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, Ц. А. Тубанов, А. Д. Базаров.* Выделение медленных вариаций времен вступлений волн при коррекции сезонных изменений вибросейсмограмм 180
34. *В. В. Ковалевский, Ц. А. Тубанов, А. Г. Фатьянов, Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, А. Д. Базаров.* Вибросейсмические исследования на 500-км профиле Бабушкин, Байкал – Улан-Батор, Монголия 186
35. *Н. А. Каргаполова.* Исследование статистической структуры пространственно-временных полей среднемесячной температуры и суммарного месячного количества осадков в районе озера Байкал 191
36. *Х. Х. Имомназаров, А. А. Михайлов.* Численное моделирование области дилатансии для совмещенной модели вязкоупругости и пороупругости 196
37. *Х. Х. Имомназаров, С. Т. Туйчиева.* Сосредоточенная сила в однородной изотропной пористой среде 201
38. *Е. Н. Голубева, Г. А. Платов, Д. Ф. Якшина.* Численное моделирование влияния атлантических вод на состояние арктического морского льда 205
39. *Г. М. Воскобойникова, М. С. Хайретдинов.* Апостериорные алгоритмы в геофизическом мониторинге 210
40. *Л. В. Воронина.* Мониторинг приземных слоев воздуха и почвенных горизонтов при разных типах погоды 215
41. *А. С. Белоносов, В. В. Ковалевский, А. Г. Максимова, А. А. Галактионова, И. И. Тагильцев.* Применение поляризационного анализа для локации сейсмических событий малой подземной сейсмической группой 219

42. *Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, Ю. А. Загорулько, О. И. Боровикова.* Онтологический подход к систематизации контента интернет-ресурса «Активная сейсмология» 224
43. *А. Ю. Белинская, О. М. Грехов.* Ионосферные измерения над Новосибирском до, во время и после сильных землетрясений 228
44. *В. Л. Янчуковский, С. А. Сюняков, В. С. Кузьменко.* Мониторинг нейтронов в широком диапазоне энергий в атмосфере 232
45. *Ц. А. Тубанов, П. А. Предеин.* Построение ГИС-ориентированной карты сейсмической опасности городских территорий (на примере г. Улан-Удэ) 238
46. *И. Н. Матвеев.* Организация канала связи для сетевой технологии сбора сейсмических данных 242
47. *А. Т. Зиновьев, К. Б. Кошелев, К. В. Марусин.* Математическое моделирование течений в р. Лена для научного обоснования инженерных мероприятий по противопаводковой защите 245
48. *И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников.* Влияние параметризации океанических течений на отклик температуры поверхности Земли на удвоение концентрации CO_2 250

CONTENTS

1. *A. V. Sementsov, V. N. Nikitin.* About the ability of camera calibration without using control points coordinates 3
2. *A. V. Sementsov, V. N. Nikitin.* Implementation of mathematical model of tripod in method of camera calibration without using control points coordinates 8
3. *A. V. Sementsov, V. N. Nikitin.* Comparison of camera calibration parameters obtained by different methods and models of distortion 17
4. *L. G. Evstratova.* Using of the true orthophoto for geographic researches 24
5. *D. V. Mozer, A. S. Tuyakbay, N. I. Gey, A. D. Karaneyeva, A. R. Estajeva.* Monitoring of deformations of the earth surface by method of the satellite radar interferometry in the area of Kostenko mine 29
6. *V. S. Korkin, A. E. Chervova.* The comparative analysis of test results DPS PHOTOMOD with routes high-precision digital mock-up images 34
7. *E. I. Saprykin, L. A. Sladkikh, E. N. Kulik.* Assessment of grain crops based on remote sensing data 40
8. *E. Yu. Sakharova, L. A. Sladkikh, E. N. Kulik.* Satellite monitoring of grain crops on basis of vegetation index' use 47
9. *M. P. Shagaev, E. N. Kulik.* Assessment of potentials of MODIS data' use for flood monitoring on the example of Chulym river flood, spring 2014 53
10. *G. G. Gorbunov, K. N. Tchikov, V. B. Shlishevsky.* Geology and ecology applications of remote sensing imaging spectrometer apparatus 60
11. *A. S. Gordienko.* Application index images for change detection in multitemporal space images 67
12. *D. N. Rakov, V. N. Nikitin, S. O. Shevchuk.* Use non-metric digital cameras during airborne geophysical researches 71
13. *E. V. Kaziak, A. V. Leshchenko.* Spectral transformation of space images Landsat 8 for agroecosystems vegetation mapping 79
14. *E. V. Kaziak, A. A. Kohno, E. O. Khrushcheva.* Research of structure and dynamics of land based on remote sensing (on the example Polesie state radiation ecological reserve) 84
15. *I. G. Yashchenko, T. O. Peremitina.* Environmental monitoring of West Siberia oil-producing territories on the basis of space images 89
16. *Yu. G. Nikitina, V. E. Gagin.* Original cartographic materials to create maps of man impact on landscapes 94
17. *E. R. Semakova.* Preliminary results of the digital elevation models generation for some areas of Central and Western Tien-Shan 99
18. *V. N. Antonov, O. G. Novgorodtseva.* Monitoring and mapping of flood situation in the Siberian federal district 104
19. *A. A. Yakimenko, D. A. Karavaev, A. V. Belyashov.* Modeling of seismic fields in problems of monitoring and forecasting of consequences of underground nuclear tests 111
20. *M. S. Yudin.* Calculation of velocities of gravity flows over steep obstacles in a stratified atmosphere 116
21. *M. S. Khairetdinov, G. M. Voskoboynikova, G. F. Segukhina.* Informative factors of interaction of the interfaced fields in the problem of geophysical monitoring 120
22. *V. F. Raputa, N. P. Akhmatova, T. V. Yaroslavtseva, V. V. Turbinsky.* The research of dust deposition around the area of Novosibirsk thermal power station 125

23. *N. N. Semakov, A. A. Kovalyov, O. I. Fedotova, A. F. Pavlov.* About the speed of the movement of magnetic poles and need of creation of the Russian service of the true magnetic pole 130
24. *E. A. Pyanova*. Study of passive pollutants transport in the atmosphere of Cisbaikalia based on scenario numerical modeling 135
25. *A. V. Penenko, A. A. Sorokovoy*. Application of discrete analytical approach to the solution of Smoluchowski equation 140
26. *A V. Penenko.* DIrect variational data assimilation algorithm for atmospheric chemistry data 145
27. *V. A. Shlychkov, V. A. Ogorodnikov, O. V. Sereseva.* Joint numerical stochastic models of daily river flow and spatio-temporal fields of daily precipitation 150
28. *V. V. Malakhova.* Modeling of current state of the subsea permafrost of the East Siberian shelf 155
29. *A. A. Lezhenin, V. F. Raputa, T. V. Yaroslavtseva, I. A. Solov'eva.* Assessment of the influence of orography on the distribution of dust emissions from the Iskitim cement plant 160
30. *L. I. Kurbatskaya, A. F. Kurbatskiy.* Mesoscale numerical model of urban heat island in stably stratified environment 165
31. *V. I. Kuzin, N. A. Lapteva*. Calculation of the Siberian rivers runoff in the XXI century 170
32. *V. A. Shlychkov, A. I. Krylova*. Sensitivity of a numerical model of the Lena river delta to boundary conditions on sea water boundaries 175
33. *V. V. Kovalevsky, L. P. Braginskaya, A. P. Grigoryuk. T. A. Tubanov, A. D. Bazarov.* Determination wave arrival times slow variations using correction of seasonal changes in vibroseismograms 180
34. *V. V. Kovalevsky, T. A. Tubanov, A. G. Fatyanov, L. P. Braginskaya, A. P. Grigoryuk, A. D. Bazarov.* Vibroseismic research on 500 km profile Babushkin, Baykal – Ulan Bator, Mongolia 186
35. *N. A. Kargapolova*. Analysis of statistical structure of spatial-time fields of average monthly temperature and monthly precipitation sums in the lake Baikal region 191
36. *Kh. Kh. Imomnazarov, A. A. Mikhailov.* Numerical modeling of the dilatancy fields for a combined model of a viscoelastic and poroelastic media 196
37. *Kh. Kh. Imomnazarov, S. T. Tuychieva.* Concentrated force in a homogeneous isotropic porous medium 201
38. *E. N. Golubeva, G. A. Platov, D. F. Iakshina.* A numerical modeling of the influence of the atlantic water on the arctic sea ice state 205
39. *G. M. Voskoboynikova, M. S. Khairetdinov.* Posteriori algorithms in the problem of geophysical monitoring 210
40. *L. V. Voronina.* Monitoring surface layers of air and soil layers with different types of weather 215
41. *A. S. Belonosov, V. V. Kovalevsky, A. G. Maksimova, A. A. Galaktionova, I. I. Tagiltsev.* Polarization analysis application for seismic events location by small underground seismic array 219
42. *L. P. Braginskaya, A. P. Grigoruk, Yu. A. Zagorulko, O. I. Borovikova.* Integration of scientific knowledge in active seismology 224
43. *A. Yu. Belinskaia, O. M. Grekhov.* Ionospheric measurements of Novosibirsk before, during and after earthquakes 228
44. *V. L. Yanchukovskiy, S. A. Syunyakov, V. S. Kuzmenko.* Monitoring neutrons in a wide range energy in the atmosphere 232
45. *Ts. A. Tubanov, P. A. Predein.* The creation of a GIS-based seismic hazard maps of urban areas (for example, Ulan-Ude) 238

46. *I. N. Matveyev.* Arrangement of communication channel for seismic data collection by network technologies 242
47. *A. T. Zinoviev, K. B. Koshelev, K. V. Marusin.* Mathematical modeling of flows in Lena river for scientific substantiation of engineering measures for flood protection 245
48. *I. V. Borovko, V. N. Krupchatnikov.* Oceanic currents parameterization effect on Earth's surface temperature response and CO_2 concentration 250

Научное издание

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ФОТОГРАММЕТРИЯ, МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ГЕОЭКОЛОГИЯ

Т. 1

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Л. Н. Шиловой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 14.04.2014. Формат 60 × 84 1/16
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 15,11. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.