

К оценке интенсивности горизонтального переноса снежных масс в области аномалии силы тяжести

© 2022 г. Л.Х. Ингель^{1*,2}, А.А. Макоско²

¹Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Россия;

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН Москва, Россия

*lev.ingel@gmail.com

Estimation of the intensity of the horizontal transfer of snow masses in the area of gravity anomaly

L.Kh. Ingel^{1*,2}, A.A. Makosko²

¹Research and Production Association «Typhoon», Obninsk, Russia;

²Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*lev.ingel@gmail.com

Received April 8, 2022 / Revised June 10, 2022 / Accepted July 11, 2022

Keywords: *snow cover, inhomogeneities of the gravity field, horizontal transport of a heavy admixture, analytical model.*

Summary

A number of recent publications note the observed correlation of snow/ice thickness in some arctic regions with gravity field inhomogeneities. The physical mechanisms that could cause such a correlation are still unclear. In this paper, we consider a possible mechanism for the ordered horizontal transport of heavy admixtures (in particular, snow during low snowstorms) in the surface layer of the atmosphere under the influence of the mentioned inhomogeneities. In the area of gravity anomaly, in addition to variations of the vertical component, there are also components of this force that are tangential to the mean Earth ellipsoid. In flat mesoscale atmospheric models, these are additional horizontal forces, to which the dynamics of the atmosphere is quite sensitive. It seems appropriate to evaluate the possible systematic influence of such forces on the horizontal transport of heavy impurities in the atmosphere, which include, for example, snow coming from the surface into the surface layer of air at sufficiently strong winds (in situations such as low snowstorms). It is assumed that in the absence of a heavy admixture, the medium is in a static state, in which the horizontal component of gravity is compensated by the horizontal pressure gradient. When admixture enters the air, the average density of the medium changes, and in the presence of a horizontal component of gravity, an additional horizontal force appears. Its effect was studied within the framework of a simple linear analytical model. Estimates show that although the rate of additional horizontal transport is very low, the effect that accumulates over many years can be noticeable.

Citation: Ingel L.Kh., Makosko A.A. Estimation of the intensity of the horizontal transfer of snow masses in the area of gravity anomaly. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (3): 360–362. [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422030137, edn: eqianf.

Поступила 8 апреля 2022 г. / После доработки 10 июня 2022 г. / Принята к печати 11 июля 2022 г.

Ключевые слова: *снежный покров, неоднородности поля силы тяжести, горизонтальный перенос тяжёлой примеси, аналитическая модель.*

В литературе отмечается наблюдаемая корреляция толщины снежного/ледяного покрова в некоторых арктических регионах с аномалиями силы тяжести. Рассматривается возможный механизм упорядоченного горизонтального переноса тяжёлых примесей (снега) в атмосфере в неоднородном поле силы тяжести. Проанализированная теоретическая модель показывает, что эффект, накапливающийся в течение многих лет, может быть существенным.

Введение

В ряде недавних публикаций отмечается корреляция толщины снежного/ледяного покрова в некоторых арктических регионах (в окраинных арктических морях) с неоднородностями поля силы тяжести (Sharov, Nikolskiy, 2016). Физические механизмы, вызывающие такую корреляцию,

пока не ясны. В области аномалии силы тяжести, кроме вариаций вертикальной составляющей, существуют также составляющие этой силы, касательные к общему земному эллипсоиду. В плоских мезомасштабных атмосферных моделях это — дополнительные горизонтальные силы, к которым динамика атмосферы весьма чувствительна. Целесообразно оценить возмож-

ное систематическое влияние таких сил на горизонтальный перенос тяжёлых примесей в атмосфере, к которым относится, например, снег, поступающий с поверхности в приземный слой воздуха при достаточно сильных ветрах (в ситуациях типа низовых метелей).

Математическая модель

В рамках плоской мезомасштабной модели приземного слоя атмосферы использована декартовая система координат. Рассматривается полуограниченная среда, ограниченная снизу твёрдой горизонтальной подстилающей поверхностью $z = 0$ (ось z направлена вертикально вверх, ось x – вдоль горизонтальной компоненты силы тяжести). В неоднородном поле силы тяжести считаем заданной горизонтальную составляющую ускорения силы тяжести g_x . С нижней границы в среду поступает тяжёлая примесь, задан диффузионный поток:

$$\chi(\partial\mu/\partial z) = -M \text{ при } z = 0, \quad (1)$$

где μ – массовая концентрация тяжёлой примеси; χ – коэффициент её диффузии; M – плотность потока примеси, кг/(м²с).

Если поступление примеси горизонтально-однородно, то её стационарное горизонтально-однородное распределение описывается уравнением диффузии с учётом оседания частиц:

$$-v(\partial\mu/\partial z) = \chi(d^2\mu/dz^2), \quad (2)$$

где v – абсолютная величина скорости оседания частиц примеси.

Горизонтальную проекцию стационарного уравнения динамики запишем как

$$0 = -(\partial p/\partial x) + \rho v \Delta u + \rho g_x, \quad (3)$$

где p – давление; ρ – полная плотность среды; v – коэффициент кинематической вязкости; u – скорость возникающего горизонтального течения; Δ – символ лапласиана.

Горизонтальную составляющую ускорения силы тяжести g_x далее считаем известной и в рассматриваемой области постоянной, т.е. предполагается баланс горизонтальной составляющей силы тяжести, сил горизонтального градиента давления и вязкости. Не учитываем здесь кориолисову силу, которая на пространственно-вре-

менных масштабах низовой метели несущественна. Плотность складывается из двух слагаемых:

$$\rho = \bar{\rho} + \mu,$$

где μ – парциальная плотность примеси; чертой обозначаются фоновые значения величин.

Имеется в виду, что при отсутствии поступления тяжёлой примеси среда находится в статическом состоянии, в котором

$$\partial\bar{\rho}/\partial x = \bar{\rho}g_x. \quad (4)$$

(совпадение в статическом состоянии изобар и изопикн с эквипотенциальными поверхностями доказано для случая идеальной среды (Кочин, 1949), отличие от которой в данном контексте не принципиально).

В формуле (4) горизонтальная составляющая силы тяжести скомпенсирована горизонтальным градиентом давления. При поступлении в среду тяжёлой примеси в уравнение (3) добавляется некомпенсированная горизонтальная сила μg_x . Поступление примеси считается горизонтально-однородным, поэтому связанная с этим добавка к плотности и давлению и возникающее течение не зависят от горизонтальной координаты x ; горизонтальный градиент давления не меняется. Тогда, вычитая (4) из (3), получаем следующее уравнение:

$$v(\bar{\rho} + \mu)(\partial^2 u/\partial z^2) = -\mu g_x. \quad (5)$$

Системы (2), (5) для искомых функций $\mu(z)$, $u(z)$ решаем с краевыми условиями (1), а также с условиями прилипания и затухания возмущений вдали от подстилающей поверхности: $u = 0$ при $z = 0$; $\mu = 0$, $du/dz = 0$ при $z = \infty$.

Результаты

Решение уравнения (2) при рассматриваемых граничных условиях имеет следующий вид:

$$\mu = (M/v)\exp(-z/h), \quad h \equiv \chi/v.$$

Из формулы (5), с учётом краевых условий, получаем:

$$\frac{du}{dz} = -\frac{g_x}{v} \int_{\infty}^z \frac{\mu(z')}{\bar{\rho} + \mu(z')} dz' = \frac{g_x \chi}{v v} \ln \left[1 + \frac{M}{\bar{\rho} v} \exp\left(-\frac{z}{h}\right) \right]. \quad (6)$$

При дальнейшем интегрировании (6) скорость u выражается через специальные функции. В пре-

дельном случае $\mu \ll \bar{\rho}$, когда примесь вносит относительно малый вклад в плотность воздуха:

$$u \approx (M\chi^2 g_x / \nu u^3 \bar{\rho}) [1 - \exp(-z/h)].$$

Результат наиболее сильно зависит от скорости оседания частиц. Например, в приземном слое воздуха в условиях приземной метели (Бычкова, 2016; Ингель, 2018) $\bar{\rho} = 1 \text{ кг/м}^3$, коэффициенты турбулентного обмена $\nu = \kappa = \chi = 3 \text{ м}^2/\text{с}$, $v = 0,2 \text{ м/с}$, тогда $h = 15 \text{ м}$. Если при этом $M = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/(м}^2\text{с)}$, а $g_x = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$ (Sharov, Nikolskiy, 2016), то характерное значение массовой концентрации примеси составляет $0,1 \text{ кг/м}^3$, а порядок скорости возникающего течения $4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Использование здесь стационарной модели оправдано тем, что полученное значение скорости достигается за весьма короткое время. Действительно, для нестационарной задачи в уравнение (5) добавляется производная по времени:

$$(\bar{\rho} + \mu)(du/dt) = \nu(\bar{\rho} + \mu)(\partial^2 u / \partial z^2) + \mu g_x.$$

После внесения тяжёлой примеси ($\mu \neq 0$) на среду начинает действовать дополнительная горизонтальная сила (последнее слагаемое в правой части). Пока вязкость не станет существенной и течение не приблизится к стационарному режиму, приближённо выполняется уравнение

$$(\bar{\rho} + \mu)(du/dt) \approx \mu g_x.$$

Отсюда получаем оценку времени Δt , необходимого для достижения скорости u :

$$\Delta t \approx (\bar{\rho} + \mu)u / (\mu g_x).$$

Для рассмотренных здесь значений параметров время выхода на стационарный режим составляет порядка 1 мин.

Заключение

В неоднородном поле силы тяжести существует механизм упорядоченного горизонтального переноса тяжёлых примесей в атмосфере, в частности, снежных масс. Скорость возникающих горизонтальных течений – низкая, поэтому можно говорить лишь о малой поправке к обычному ветровому переносу (Бычкова, 2016; Wamser, Lykossov, 1995). Однако важно иметь в виду, что речь идёт об эффектах перемещения примеси, которые могут накапливаться многие годы. Например, рассчитанное здесь перемещение снега, связанное с его поступлением в воздух, происходит 50 дней в течение года, и за год перемещение составляет около 20 км. Даже значительно более медленного перемещения достаточно (при прочих благоприятных условиях) для постепенного переноса снежных масс на сотни километров.

Литература

- Бычкова В.И. Параметризация процессов возникновения и эволюции низовой метели: Дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. М.: Гидрометцентр РФ, 2016. 101 с.
- Ингель Л.Х. Обобщение модели Прандтля на случай склоновых течений с тяжелой примесью // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 5. С. 104–108. doi: 10.15372/PMTF20180512.
- Кочин Н.Е. Изменение температуры и давления с высотой в свободной атмосфере. Собр. соч. Т. 1. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 530–591.
- Sharov A., Nikolskiy D. Outlines and dynamics of eurasctic ice caps in anomalous gravity fields // Living Planet Symposium, Proceedings of the conference held 9–13 May 2016 in Prague, Czech Republic. Ed. by L. Ouwehand. ESA-SP. V. 740. P. 328. https://www.researchgate.net/publication/303279393_OUTLINES_AND_DYNAMICS_OF_EURARCTIC_ICE_CAPS_IN_ANOMALOUS_GRAVITY_FIELDS.
- Wamser C., Lykossov V.N. On the friction velocity during blowing snow // Contributions to Atmospheric Physics. 1995. V. 68. № 1. P. 85–94.

References

- Bychkova V.I. Parametrizaciya processov vozniknoveniya i evolyucii nizovoj meteli. Parametrization of the formation and evolution of low-drifting snow. PhD. *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk*. M.: Hydrometeorological Center of the Russian Federation, 2016. 101 p. [In Russian].
- Ingel L.Kh. Generalization of a Prandtl slope flow model with a heavy admixture. *Prikladnaya mehanika i tehnikeskaya fizika*. Journ. of Appl. Mech. Tech. Phys. 2018, 59 (5): 857–861. doi: 10.1134/S0021894418050127.
- Kochin N.E. *Izmenenie temperatury i davleniya v vysotoj v svobodnoj atmosfere*. Change in temperature and pressure with height in the free atmosphere. Collected works. V. 1. M.-L.: Izd. AN SSSR, 1949: 530–591. [In Russian].
- Sharov A., Nikolskiy D. Outlines and dynamics of eurasctic ice caps in anomalous gravity field. Living Planet Symposium. Proc. of the conf. held 9–13 May 2016 in Prague, Czech Republic. Ed. by L. Ouwehand. ESA-SP. V. 740. P. 328. https://www.researchgate.net/publication/303279393_OUTLINES_AND_DYNAMICS_OF_EURARCTIC_ICE_CAPS_IN_ANOMALOUS_GRAVITY_FIELDS.
- Wamser C., Lykossov V.N. On the friction velocity during blowing snow. Contributions to Atmospheric Physics. 1995, 68 (1): 85–94.