

положного по знаку большого вклада от электронов проводимости, поляризованных неоднородным электрическим полем локализованных зарядов ионных остовов. Видно, что рассчитанные значения согласуются с данными для металлических матриц (особенно в случае Fe^{2+}). Следовательно, есть основания предполагать, что и для интерметаллических редкоземельных соединений типа RFe_2 основными вкладами в градиент электрического поля в области расположения ядер ^{57}Fe являются вклады от локализованных зарядов ионных остовов атомов решетки и поляризованных ими электронов проводимости.

Литература

1. Тейлор К., Дарби М. Физика редкоземельных соединений. М., 1974.
2. Николаев В.И., Русаков В.С., Федоренко И.В. Методы мёссбауэровских исследований спиновой переориентации. М., 1988.
3. Burzo E., Chelkowski A., Kirchmayr H.R. // From Landolt-Börnstein New Series. III/19d2. Springer-Verlag, 1990. P. 83.
4. Raj P., Kulshreshta S.K. // J. Physique. 1980. 41. P. 1487.
5. Meyer C., Hartmann-Boutron, Gros Y. et al. // J. Physique. 1981. 42. P. 605.
6. Николаев В.И., Русаков В.С., Солодченкова Т.Б. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1990. 54, № 9. С. 1681.

7. Николаев В.И., Русаков В.С., Солодченкова Т.Б. // Магнетизм редкоземельных сплавов. Грозный, 1992. С. 72.
8. Ilyushin A.S., Wallace W.E. // J. Solid. State Chemistry. 1976. 17. P. 131.
9. Илюшин А.С. // Магнетизм редкоземельных сплавов. Грозный, 1992. С. 48.
10. Rusakov V.S., Chistyakova N.I. // Lat. Amer. Conf. on Application of the Mössbauer Effect (LACAME'92). Buenos Aires, Argentina, 1992. No. 7-3.
11. Николаев В.И., Русаков В.С. Мёссбауэровские исследования ферритов. М., 1985.
12. Cranshaw T.E. // Advances in Mössbauer Spectroscopy / Eds. B. V. Thosar, P. K. Lyengar. Amsterdam; Oxford; New York, 1983. P. 217.
13. Шпинель В.С. Резонанс гамма-лучей в кристаллах. М., 1969.
14. Mössbauer Spectroscopy. / Eds. D. P. E. Dickson, F. J. Berry. Cambridge University Press, 1986.
15. Sawicki J.A. // Phys. Stat. Solidi. (b). 1972. 53. P. K103.
16. Raghavan P., Kaufmann E.N., Raghavan R.S. et al. // Phys. Rev. 1976. B13, No. 7. P. 2835.

Поступила в редакцию
20.04.98

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.466.31

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ ВОЛНАМИ И ТЕЧЕНИЕМ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ГЕНЕРАЦИИ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Е. П. Анисимова, К. В. Показеев, Н. И. Соболева, А. А. Сперанская

(кафедра физики моря и вод суши)

Приводятся результаты исследования ряда характеристик процесса энергообмена в системе ветро-волнового взаимодействия. Обсуждается начальная стадия развития дрейфового течения и волн. По данным лабораторных экспериментов определена связь между динамическими скоростями ветрового потока и дрейфового течения. Показано, что для обсуждаемых в статье условий на рост волн затрачивается только 33% потока импульса, поступающего в водоем из атмосферы, а остальная часть этого потока расходуется на генерацию и развитие дрейфового течения. Рассчитаны составляющие энергетического баланса на водной поверхности для начальной стадии ветро-волнового взаимодействия.

Одной из центральных задач в изучении пограничного слоя вода-воздух следует считать исследование энергообмена в системе ветер-волны на различных этапах развития последних. Это очевидно, так как ветро-волновое взаимодействие — одно из важнейших звеньев проблемы взаимодействия гидросферы и атмосферы в целом. Велика роль пограничного слоя вода-воздух и в экологических процессах, поскольку именно здесь формируются основные механизмы самоочистки, освобождающие водную поверхность от многих видов загрязнений и фильтрующие приводный воздушный поток от газообразных и взвешенных примесей. Несмотря на актуальность

проблемы, число работ, в которых исследуется энергообмен на границе раздела вода-воздух, невелико.

В настоящей работе выполнено исследование ряда характеристик процесса энергообмена при ветро-волновом взаимодействии. Обсуждается начальная стадия ветрового волнения, когда волны движутся со скоростями, много меньшими средней скорости ветра на уровне волн-шероховатостей, т. е. когда безразмерный возраст волны c/u_{*a} — величина порядка единицы. Здесь c — фазовая скорость энергонесущей компоненты ветровых волн, u_{*a} — динамическая скорость, или скорость трения, ветрового потока. Исследование проведено на основе как собственных

материалов авторов [1–3], так и материалов, заимствованных из литературы [4–12].

Эксперименты авторов, описанные в работах [1–3], были выполнены в гидроаэроканале гидрофизической лаборатории МГУ. В процессе опытов при различных ветро-волновых режимах на расстояниях $X \leq 12$ м от входа воздушного потока в аэрогидроканал определялись вертикальные профили скорости воздушного потока и дрейфового течения. В период экспериментов безразмерный возраст волн $C^+ = c/u_{*a}$ изменялся от 0,6 до 2,5, а безразмерный разгон $X^+ = Xg/u_{*a}^2$ — от 50 до 2500. Измерения проводились в 50-см приводном слое воздуха и в 10-см приповерхностном слое воды в условиях нейтральной стратификации плотности как в воздушной, так и в водной среде. Методика экспериментов подробно описана в работах [1–3, 11].

Согласно существующим представлениям (см., напр., [7, 10, 13]), профили средней скорости воздушного потока $u_a(z)$ над водной поверхностью и дрейфового течения $u_{dr}(z)$ в воде описываются логарифмическими зависимостями вида

$$u_a(z) = u_s + \frac{u_{*a}}{\chi} \ln \frac{z}{z_{0a}}, \quad (1)$$

$$u_{dr}(z) = u_s - \frac{u_{*dr}}{\chi} \ln \frac{z}{z_{0dr}}, \quad (2)$$

где u_s — поверхностная скорость, χ — постоянная Кармана, u_{*a} и z_{0a} — скорость трения и параметр шероховатости ветрового потока, u_{*dr} и z_{0dr} — аналогичные характеристики дрейфового течения. Зависимости (1) и (2) хорошо подтверждаются данными, используемыми в настоящей работе.

Из соотношений (1) и (2) легко рассчитать величины динамических скоростей в воздухе u_{*a} и в воде u_{*dr} :

$$u_{*a} = \frac{u_a(z_2) - u_a(z_1)}{\ln(z_2/z_1)}, \quad u_{*dr} = \frac{u_{dr}(z_2) - u_{dr}(z_1)}{\ln(z_2/z_1)} \quad (3)$$

(в воздухе ось z направлена вверх, в воде — вниз от границы раздела сред).

Одним из параметров, входящих в выражения (1) и (2) и требующих определения, является поверхностная скорость u_s . Согласно [14], между величиной u_s и скоростью трения воздушного потока u_{*a} должна существовать связь вида

$$u_s = 0,55u_{*a}. \quad (4)$$

Зависимость (4) подтверждена рядом исследователей и хорошо выполняется для данных, используемых в настоящей работе (см. рис. 1, где разными значками представлены результаты измерений различных авторов, полученные в лабораторных условиях).

Обычно используемыми характеристиками энергообмена атмосферы и ветровых волн являются плотности потоков импульса и энергии. Поток импульса τ_a , поступающий из атмосферы в водоем, тратится

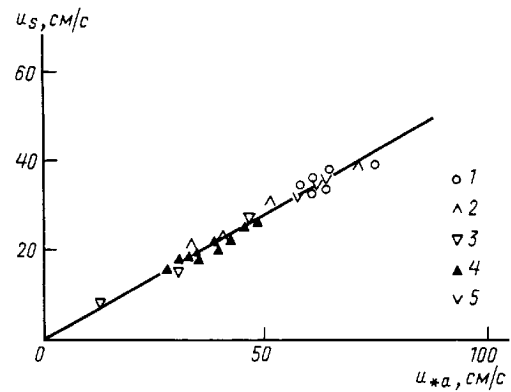


Рис. 1. Зависимость поверхностной скорости дрейфового течения u_s от динамической скорости ветра u_{*a} , построенная по данным [5] — 1, [9, 10] — 2, [6] — 3, [15] — 4, [4] — 5. Прямая линия — зависимость (4)

на формирование дрейфового течения (τ_{dr}) и на рост волн (τ_w):

$$\tau_a = \tau_{dr} + \tau_w. \quad (5)$$

Величины τ_a и τ_{dr} могут быть выражены через динамические скорости ветра u_{*a} и дрейфового течения u_{*dr} соответственно:

$$\tau_a = \rho_a u_{*a}^2, \quad \tau_{dr} = \rho_w u_{*dr}^2, \quad (6)$$

где ρ_a и ρ_w — плотность воздуха и воды (в дальнейших расчетах полагалось $\rho_a = 1,25 \cdot 10^{-3}$ г/см³, а $\rho_w = 1$ г/см³).

Как известно [5–8], на начальной стадии процессу генерации волн предшествует возникновение и развитие дрейфового течения. До момента возникновения ветровых волн весь поток τ_a расходуется на образование течения, т. е. в этот период $\tau_{dr} = \tau_a$. Член τ_w в зависимости (5) появляется лишь с момента появления волн.

Результаты работ [4–6, 8, 10, 12] позволили выявить связь между величинами динамических скоростей ветрового потока и соответствующего ему дрейфового течения, т. е. между u_{*a} и u_{*dr} . Согласно рис. 2, для большинства использованных в настоящей работе данных измерений хорошо выполняется линейная зависимость:

$$u_{*dr} = 0,029u_{*a}. \quad (7)$$

Исключение составляют результаты работы [5] и некоторые значения u_{*dr} и u_{*a} , полученные в работах [7, 9]. Причины отклонения объясняются ниже.

По формулам (6) были рассчитаны величины τ_a и τ_{dr} и найдено их отношение τ_{dr}/τ_a . Если принять, как упоминалось выше, что в самый начальный период взаимодействия ветрового потока с водной поверхностью $\tau_{dr} = \tau_a$, то при росте разгона X^+ отношение τ_{dr}/τ_a сначала уменьшается. При значениях $X^+ \cong 200$ величина τ_{dr}/τ_a достигает некоторого минимального значения, а при больших разгонах растет и выходит на постоянное значение, равное 0,67, которое сохраняется вплоть до значений $X^+ = 14000$ и хорошо согласуется с соотношением динамических скоростей ветрового потока и дрейфа (7). Выявлено

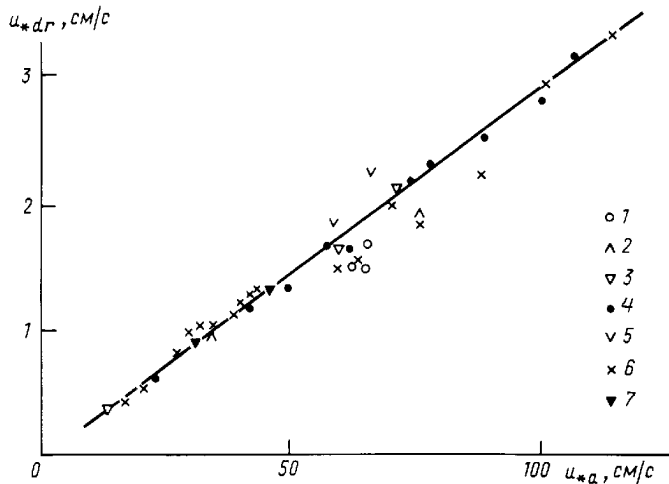


Рис. 2. Соотношение между динамической скоростью дрейфового течения u_{*dr} и динамической скоростью ветра u_{*a} по данным непосредственных измерений, заимствованным из [5] — 1, [9, 10] — 2, [6] — 3, [1] — 4, [4] — 5, [7] — 6, [16] — 7. Прямая линия — зависимость (7)

также, что данные, обуславливающие минимум в зависимости $\tau_{dr}/\tau_a = f(X^+)$, соответствуют тем значениям u_{*dr} и u_{*a} , которые на рис. 2 отклоняются от зависимости (7).

По формуле (5) можно определить величину плотности потока импульса τ_w , идущего на рост волн, и проследить зависимость величины τ_w/τ_a от разгона X^+ . Естественно, что при таком способе определения величины τ_w/τ_a характер изменения ее при изменении X^+ будет зеркальным отражением зависимости $\tau_{dr}/\tau_a = f(X^+)$.

Как упоминалось выше, данные об изменении τ_{dr}/τ_a с ростом разгона X^+ для начальной стадии взаимодействия ветра с водной поверхностью в литературе весьма малочисленны и анализ зависимости $\tau_{dr}/\tau_a(X^+)$ ранее не проводился. Что касается зависимости τ_w от X^+ , то результаты лабораторных экспериментов [16–19] подтвердили, что отношение τ_w/τ_a растет (а следовательно, уменьшается τ_{dr}/τ_a) на начальной стадии развития волнения. В работе [8] отмечалось изменение динамической скорости дрейфового течения u_{*dr} при изменении скорости ветрового потока u_a от 4,2 до 7,7 м/с и увеличении разгона от 3 до 9 м. При этом наблюдалось падение величины u_{*dr} (а следовательно, и τ_{dr}) при фиксированном значении τ_a и росте разгона, т. е. имело место возрастание плотности потока импульса τ_w , поступающего к волнам.

Таким образом, на начальной стадии развития ветрового волнения и дрейфового течения при значениях безразмерного разгона X^+ от 200 до ~ 14700 только 33% потока импульса, поступающего из атмосферы в водоем, идет на рост волн, а остальная часть его расходуется на генерацию и развитие дрейфового течения. При значениях безразмерного разгона $X^+ \cong 200$ в распределениях $\tau_{dr}/\tau_a = f(X^+)$ и $\tau_w/\tau_a = f(X^+)$ наблюдаются экстремумы, выяснение природы которых требует проведения дополнительных исследований. Возможно, существование экстре-

мумов связано с изменением формы волны при увеличении разгона.

Поскольку поверхность, разделяющая водные и воздушные массы, подвижна, то действующие на границе их контакта силы будут совершать работу и можно оценить составляющие динамического энергетического баланса. Рассчитаем удельную мощность, обусловленную действием трения ветра о подстилающую водную поверхность (E_{τ_a}), дрейфового потока ($E_{\tau_{dr}}$) и движущихся волн (E_{τ_w}). Для оценки удельных мощностей E_{τ_a} , $E_{\tau_{dr}}$ и E_{τ_w} обычно используются комбинации вида

$$E_{\tau_a} = \tau_a u_{*a}, \quad E_{\tau_{dr}} = \tau_{dr} u_s, \quad E_{\tau_w} = \tau_w c. \quad (8)$$

Если пренебречь потерями на вязкое трение, то для составляющих энергетического баланса на поверхности воды должно выполняться соотношение

$$E_{\tau_a} = E_{\tau_{dr}} + E_{\tau_w}. \quad (9)$$

Результаты расчета составляющих энергетического баланса по формулам (8) показали, что величины E_{τ_a} и $(E_{\tau_{dr}} + E_{\tau_w})$ связаны линейной зависимостью, но при этом коэффициент пропорциональности между левой и правой частями (9) превышает единицу, т. е. энергия, поступающая из атмосферы в водоем за счет напряжения трения ветра, значительно превышает энергию, затрачиваемую на генерацию дрейфового течения и на рост волн. Найденная методом наименьших квадратов зависимость

$$E_{\tau_a} = a(E_{\tau_{dr}} + E_{\tau_w}) \quad (10)$$

изображена на рис. 3 штриховой линией. Оценки показали, что нельзя объяснить такое расхождение между приходной и расходной частями энергетического баланса на водной поверхности тем, что не учитывались потери на вязкое трение.

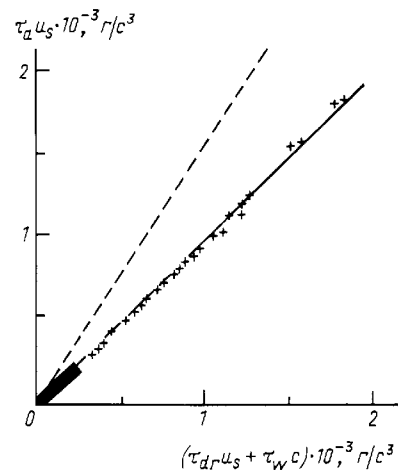


Рис. 3. Соотношение между составляющими энергетического баланса (9). Пунктирная линия — зависимость (10), сплошная — (11)

По мнению авторов, расчет удельной мощности, обусловленной действием трения ветрового потока о водную поверхность, следует проводить по формуле

$$E_{\tau_a} = \tau_a u_s.$$

Результаты расчета составляющих энергетического баланса при таком определении $E_{\tau a}$ приведены на рис. 3 разными значками. В зачерненной области сосредоточено 69 точек, рассчитанных по данным различных авторов. Сплошной линией изображена зависимость

$$\frac{E_{\tau a}}{E_{\tau dr} + E_{\tau w}} = 1. \quad (11)$$

Как видно из рис. 3, при расчете по формуле (11) энергетический баланс на поверхности водоема хорошо выполняется. Некоторое расхождение с зависимостью (11) скорее всего обусловлено тем, что не учитывались потери на вязкое трение.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-64547), Федеральной целевой программы (ФЦП) «Интеграция» (грант 2.1-304) и подпрограммы ФЦП «Комплексные исследования океанов и морей Арктики и Антарктики».

Литература

1. Сперанская А.А. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1984.
2. Лейкин И.А., Показеев К.В., Розенберг А.Д. // Изв. АН СССР, ФАО. 1984. 20, №4. С. 297.
3. Кононкова Г.Е., Никитина Е.А., Поборчая Л.В., Сперанская А.А. // Там же. 1969. 5, №5. С. 504.

4. Баргуев С.Г. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1992.
5. Lin I.T., Hak M.G. // J. Geophys. Res. 1984. 89. P. 627.
6. Shemdin O.H. // J. Phys. Oceanogr. 1972. 2. P. 411.
7. Wu J. // J. Fluid Mech. 1968. 34. P. 91.
8. Hsu C.T., Wu H.Y., Hsu E.Y., Street R.L. // J. Phys. Oceanogr. 1982. 12. P. 929.
9. Доброклонский С.В., Лесников Б.М. // Изв. АН СССР, ФАО. 1962. 8, №11. С. 1177.
10. Доброклонский С.В., Лесников Б.М. // Там же. 1975. 11, №9. С. 942.
11. Лесников Б.М. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1975.
12. Bye I.A.T. // Limnology and Oceanogr. 1965. 10. P. 451.
13. Кононкова Г.Е., Поборчая Л.В. // Изв. АН СССР, ФАО. 1974. 10, №5. С. 552.
14. Phillips O.M., Banner M.L. // J. Fluid Mech. 1974. 66. P. 625.
15. Wu J. // Tellus. 1978. 30, No. 1. P. 93.
16. Показеев К.В., Воронин Л.М. // Изв. АН СССР, ФАО. 1982. 18, №3. С. 889.
17. Kawai S. // J. Fluid Mech. 1979. 93. P. 667.
18. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л., 1970.
19. Plant W.I., Wright I.W. // J. Fluid Mech. 1977. 82. P. 767.

Поступила в редакцию
13.05.97

УДК 539.038

ПРИЛИВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

В. И. Григорьев, В. С. Ростовский

(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)

Показано, что истолкование геоэлектрического поля как результата бароэлектрического перераспределения зарядов в Земле, вызываемого приливными воздействиями, позволяет объяснить различие временного хода поля ясной погоды над континентами и над океанами.

После того как Лемонье [1] обнаружил, что над поверхностью Земли в ясную, безоблачную погоду имеется электрическое поле, возник целый ряд проблем: каково это поле, каковы физические причины его возникновения, вариаций и т.д. Эти вопросы освещены в ряде книг и статей (см., напр., [2–4]).

Почти все авторы признавали, что причиной возникновения поля ясной погоды является наличие у Земли отрицательного электрического заряда; но каково его происхождение и, главное, каков механизм его регенерации (без которой, как было уже давно понято, Земля из-за проводимости воздуха, открытой еще Кулоном, должна была бы «разрядиться» примерно за 10 минут), — оставалось, мягко говоря, не вполне понятно. Но сравнительно недавно было выдвинуто новое объяснение существования поля ясной погоды и его основных свойств.

В ряде работ [5–8] было показано, что для истолкования поля ясной погоды вовсе не обязательно приписывать Земле электрический заряд. В этих

работах рассматривалась модель Земли как проводящего незаряженного шара, в котором из-за перепадов давлений происходит перераспределение зарядов (бароэлектрический эффект). Если модель планеты сферически симметрична (это касается и распределения давлений в ней), то бароэлектрическое поле не проникает во внешнюю область. Если же эта симметрия нарушена, бароэлектрическое поле возникает и в области над поверхностью планеты. В числе причин таких нарушений особое значение имеют испытываемые ею приливные воздействия.

В этих работах рассматривался простейший вариант выбора модели: планета — химически однородный электронейтральный проводящий шар радиуса R и массы M , на который оказывает приливное действие лишь единственный спутник массы m ; расстояние между центрами спутника и планеты $R_0 \gg R$. Тогда, как показано в процитированных выше работах, вертикальная и горизонтальная компоненты напряженности «приливногo» поля не-