

Использование длительных измерений температуры в малом озере для оценки параметров перемешивания

Здоровеннов М.Р., Маханьков Д.И., Здоровеннова Г.Э., Богданов С.Р.

ИВПС КарНЦ РАН, ПетрГУ, Петрозаводск, Россия

Введение

Для того, чтобы оценить эффективность перемешивания малого полимиктического озера в период открытой воды, можно использовать подход, основанный на оценке изменения его базовой потенциальной энергии. Для решения этой задачи требуется понимание того, при каком атмосферном воздействии на водоем происходит увеличение потенциальной энергии столба воды.

Методы В данной работе разработан программный код для статистической оценки количества случаев увеличения потенциальной энергии небольшого полимиктического озера в период открытой воды под влиянием различных комбинаций атмосферного воздействия на озеро. Рассматриваются три этапа термического цикла: (1) этап весенне-летнего нагревания: от взлома льда до достижения придонной температурой годового максимума; (2) этап осеннего охлаждения: понижение придонной температуры воды от годового максимума до 4°C; (3) предледоставный период, температура воды уменьшается в пределах от 4°C до значения в день установления льда (0.1-1.5°C в разные годы). Расчет проводился по данным термоксы, которая была установлена в центральной глубоководной части оз. Вендюрского в 2007-2021 г. Дискретность измерений на косье составляла одну минуту, датчики были распределены со сдвигом по вертикали 0.5-1.5 м. По данным температурных датчиков был выполнен расчет плотности воды, затем был выполнен расчет потенциальной энергии столба воды на каждый момент времени. Затем полученные значения были осреднены по три часа для того, чтобы их было удобнее анализировать совместно с метеоданными (температуру воздуха и скорость ветра использовали по МС Петрозаводск).

Результаты На рис. 1 в качестве примера приведен график изменения потенциальной энергии столба воды в центральной части оз. Вендюрского в период с 8 мая по 4 декабря 2020 г. Синим залиты области роста потенциальной энергии. Красные точки – температура воды выше температуры воздуха, желтые точки – температура воды меньше температуры воздуха, но потенциальная энергия увеличивается.

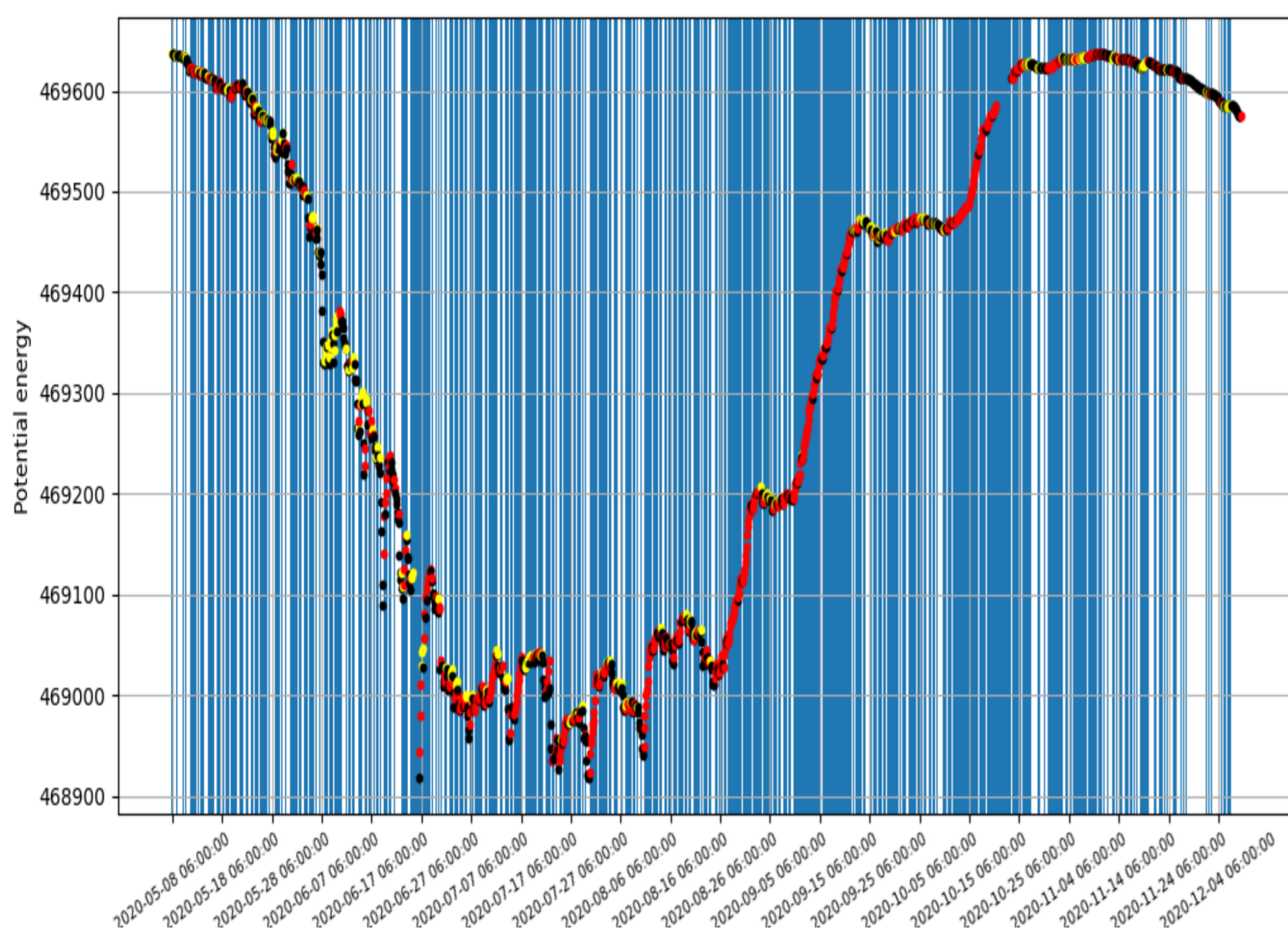


Таблица. Результаты расчета количества случаев и процент случаев роста потенциальной энергии при разных метеоусловиях в озере Вендюрском в 2020 г.

WIND 2	TEMP 2	WI+TE 2	WIND 3	TEMP 3	WI+TE 3	GROW	
112	39	164	77	114	89	331	to_MAX
34	12	50	23	34	27		%
83	96	320	55	217	199	513	to_4C
16	19	62	11	42	39		%
26	6	34	19	15	25	66	to_END
39	9	52	29	23	38		%

Рис. 1. Изменение потенциальной энергии столба воды (Дж) в центральной части озера Вендюрского в период с 8 мая по 4 декабря 2020 г.

В программе проводится анализ изменения потенциальной энергии за каждые три часа, если энергия увеличивается, то этот эпизод учитывается в анализе. Если энергия не меняется или уменьшается, это событие не принимается в расчет. Увеличение потенциальной энергии происходит как при увеличении плотности воды, так и ветровом воздействии на стратифицированную водную толщу. Увеличение плотности воды происходит при понижении ее температуры до достижения температуры максимальной плотности $T_{md}=3.98^{\circ}\text{C}$. При понижении температуры в диапазоне от T_{md} до 0°C , ее плотность уменьшается. На этапе весенне-летнего нагревания плотность воды увеличивается обычно в ночные часы при поверхностном охлаждении (эффект «ночного выхолаживания»). На этапе осеннего охлаждения, когда температура воздуха большую часть суток или в течение всех суток ниже температуры воды, происходит почти постоянное увеличение плотности воды в поверхностных слоях озера, что приводит к перемешиванию. Такой тип перемешивания возможен до достижения водой температуры максимальной плотности. Ветровое воздействие является единственным источником энергии для перемешивания столба воды при температуре воды в диапазоне $0-3.98^{\circ}\text{C}$.

Рассматриваются шесть вариантов атмосферного воздействия на озеро: (1) скорость ветра больше или равна 2м/с, температура поверхности озера не больше температуры воздуха (WIND 2); (2) температура поверхности озера больше температуры воздуха, ветер слабее 2м/с (TEMP 2); (3) ветер не слабее 2м/с и температура поверхности озера больше температуры воздуха (WI+TE 2); (4) ветер не слабее 3м/с, температура поверхности озера не больше температуры воздуха (WIND 3); (5) температура поверхности озера больше температуры воздуха, ветер слабее 3м/с (TEMP 3); (6) ветер не слабее 3м/с и температура поверхности больше температуры воздуха (WI+TE 3).

Первый и четвертый варианты показывают количество случаев роста потенциальной энергии только под действием ветра, второй и пятый – только под действием поверхностного выхолаживания, третий и шестой – совместное действие ветра и поверхностного выхолаживания. Затем для каждого из трех рассматриваемых периодов термического цикла озера проводится подсчет процентного соотношения повторяемости эпизодов перемешивания при разных вариантах атмосферного форсинга. Для каждого из трех рассматриваемых этапов термического цикла программа выдает шесть чисел, соответствующих каждому из этих шести вариантов атмосферного воздействия. Также выдается общее число случаев увеличения потенциальной энергии и проводится расчет процентного соотношения случаев этого увеличения для разных вариантов атмосферного воздействия. Для каждого года проведен расчет каждого из рассматриваемых периодов (to_MAX – период весенне-летнего нагревания, to_4C – период осеннего охлаждения, to_END – предледоставный период). Для каждого из периодов приводится количество случаев роста потенциальной энергии при ветровом воздействии (WIND2, WIND3), поверхностном охлаждении (TEMP2, TEMP3) и при совместном действии ветра и поверхностного охлаждения (WI+TE2, WI+TE3), а также процент этих случаев от общего количества случаев. Цифры 2 и 3 обозначают скорость ветра 2 и 3 м/с и соответствующую этим случаям температуру воды. В таблице приведены в качестве примера результаты расчетов для сезона открытой воды 2020 г.

Заключение Разработанный программный код может с успехом использоваться для изучения сезонной изменчивости условий перемешивания в озерах по данным о распределении температуры воды по вертикали и метеоданным.

Благодарности Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 21-17-00262